

FN- DIALOG(R)File 347:JAP10|

CZ- (c) 2001 JPO & JAP10. All rts. reserv.]

TI- GALLIUM NITRIDE SEMICONDUCTOR DEVICE AND GALLIUM NITRIDE SEMICONDUCTOR

LIGHT EMITTING DEVICE

PN- 09-293935 -JP 9293935 A-

PD- November 11, 1997 (19971111)

AU- ITAYA KAZUHIKO; NISHIO JOSHI; FUJIMOTO HIDETOSHI; SUZUKI MARIKO;
SUGIURA RISA

PA- TOSHIBA CORP [000307] (A Japanese Company or Corporation), JP (Japan)

AN- 09-025003 -JP 9725003-

AN- 09-025003 -JP 9725003-

AD- February 07, 1997 (19970207)

IC- -6- H01S-003/18; H01L-033/00

CL- 42.2 (ELECTRONICS -- Solid State Components)

KW- R002 (LASERS); R095 (ELECTRONIC MATERIALS -- Semiconductor Mixed
Crystals); R116 (ELECTRONIC MATERIALS -- Light Emitting Diodes, LED)

AB- PROBLEM TO BE SOLVED: To prevent generation of crack and improve Al
composition without thinning a layer by evading a lattice defect
problem involved in introduction of Al by specifying a thickness of
an AlGaN layer.

SOLUTION: A d₁.mu.m-thick single crystalline layer 403 which is
mainly composed of gallium nitride of Mg concentration of N₁
bg1)cm⁻³ is provided adjacent to a board 401. A d₂
2).mu.m-thick Ga_{1-x}Al_xN-base semiconductor layer 405
wherein Mg of concentration of NM₂cm⁻³ is added and whose
Al composition (x) is 0.02 or more and 1 or less is provided to a
position which holds a single crystal 403 together with the board 401
therebetween to have a relation that d₁/(1600Xx) < d₂
2) < 3.6X10^{(sup -3)XlogN/(x+0.02)+0.02} among Al composition (x),
concentration NM₂cm⁻³, concentration N₁bg1), thickness d₁
and concentration d₂. Here, as for Ncm^(sup -3), N=NM₂
g)-N₁bg1) if NM₂ > N₁bg1) and N is a back ground level of
Mg in undoped Ga_{1-x}Al_xN if NM₂ <= N₁bg1).

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願番号

特開平9-293935

(43) 公開日 平成9年(1997)11月11日

(51) Int. Cl. *

H 01 S 3/18
H 01 I. 33/00

識別記号 月内整理番号

F 1

H 01 S 3/18
H 01 I. 33/00

技術表示箇所

C
F.

審査請求 未請求 請求項の数 7

O.L.

(全24頁)

(21) 出願番号 特願平9-25003 (71) 出願人 000003078
 株式会社東芝
 神奈川県川崎市幸区川崎町72番地
 (72) 発明者 板谷 和彦
 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株
 式会社東芝研究開発センター内
 (72) 発明者 西尾 旗司
 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株
 式会社東芝研究開発センター内
 (72) 発明者 藤本 英俊
 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株
 式会社東芝研究開発センター内
 (74) 代理人 弁理士 鈴江 武彦 (外6名)

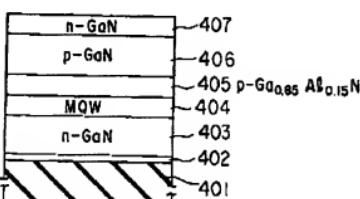
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】窒化ガリウム系半導体素子及び電化ガリウム系半導体発光装置

(57) 【要約】

【課題】 Al導入に伴う格子不整問題を回避し、GaAlNの陥みを得ることなくクラックの発生を防止し、かつ、AlGaN層のAl組成を高める。

【解決手段】 基板と、基板に近接して設けられ、マグネシウム濃度N_{Mg} c m⁻³の窒化ガリウムを主成分とした厚みd₁ μmの単結晶層と、基板とで前記単結晶層を挟む位置に設けられ、濃度N_{Mg} c m⁻³のマグネシウムが添加されるとともに、Al組成xが0.02以上1以下となる厚みd₂ μmのGa_{1-x}Al_xNを主成分とする半導体層とを備え、Al組成x、濃度N_{Mg}、濃度N_{Mg}、厚みd₁、及び厚みd₂との間に次の関係を有する窒化ガリウム系半導体素子である。d₂ / (1600 × x) < d₂ < 3.6 × 10⁻³ × log N_{Mg} / (x + 0.02) + 0.02。ここで、N_{Mg} c m⁻³は、N_{Mg} > N_{Si} の場合、N = N_{Mg} - N_{Si}、N_{Mg} ≤ N_{Si} の場合、Nは無添加のGa_{1-x}Al_xNにおけるマグネシウムのパックグラウンドレベル。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板と、

前記基板に近接して設けられ、マグネシウム濃度 N_{Mg} c m⁻³の窒化ガリウムを上成分とした厚み d_1 μmの単結晶層と、

前記基板とで前記単結晶層を挟む位置に設けられ、濃度 N_{Mg} c m⁻³のマグネシウムが添加されるとともに、Al組成xが0.02以上1以下となる厚み d_2 μmのGa_{1-x}Al_xNを主成分とする半導体層とを備え、前記Al組成x、前記濃度 N_{Mg} 、前記濃度 N_{Al} 、厚み d_1 及び厚み d_2 との間に以下の関係を有する窒化ガリウム系半導体素子。

$$d_1 / (1600 \times x) < d_2 < 3.6 \times 10^{-3} \times \log N / (x + 0.02) + 0.02$$

ここで、N c m⁻³は、

$$N_{Mg} > N_{Al}$$

$N_{Mg} \leq N_{Al}$ の場合、N = $N_{Mg} - N_{Al}$ 、
N_{Mg} > N_{Al} の場合、Nは無添加のGa_{1-x}Al_xNにおけるマグネシウムのバックグラウンドレベルである。

【請求項2】 レーザ発振可能に構成された活性層と、前記活性層に近接して設けられたn型Al_{1-x}GaN層とを備え、前記活性層に近接する前記半導体層と、前記n型Al_{1-x}GaN層とによって前記活性層が挟まれるように配置され、かつ、前記半導体層の層厚を前記n型Al_{1-x}GaN層の層厚よりも厚くした請求項1記載の窒化ガリウム系半導体素子。

【請求項3】 レーザ発振可能に構成された活性層と、前記活性層に近接して設けられたn型Al_{1-x}GaN層とを備え、前記活性層に近接する前記半導体層と、前記n型Al_{1-x}GaN層とによって前記活性層が挟まれるように配置され、かつ、前記半導体層のA₁組成を前記n型Al_{1-x}GaN層のA₁組成よりも高くした請求項1記載の窒化ガリウム系半導体素子。

【請求項4】 基板と、

前記基板に近接して設けられ、硅素濃度 N_{Si} c m⁻³の窒化ガリウムを上成分とした厚み d_1 μmの単結晶層と、前記基板とで前記単結晶層を挟む位置に設けられ、濃度 N_{Si} c m⁻³の硅素が添加されるとともに、Al₁組成xが0.02以上1以下となる厚み d_2 μmのGa_{1-x}Al_xNを主成分とする半導体層とを備え、前記Al₁組成x、前記濃度 N_{Si} 、前記濃度 N_{Al} 、厚み d_1 及び厚み d_2 との間に以下の関係を有する窒化ガリウム系半導体素子。

$$d_1 / (1600 \times x) < d_2 < 3.2 \times 10^{-3} \log N / (x + 0.02) + 0.02$$

ここで、N' (c m⁻³) は、

$$N_{Si} > N_{Al}$$

$N_{Si} \leq N_{Al}$ の場合、N' = $N_{Si} - N_{Al}$ 、
N_{Si} > N_{Al} の場合、N'は無添加のGa_{1-x}Al_xNの純度のバックグラウンドレベルである。

【請求項5】 前記単結晶層とで前記半導体層を挟む位

置に設けられ、かつ光を放出可能に構成された活性層と、

前記半導体層とで前記活性層を挟む位置に設けられ、濃度 N_{Mg} c m⁻³のマグネシウムが添加されるとともに、Al₁組成xが0.02以上1以下となる厚み d_3 μmのGa_{1-x}Al_xNを主成分とするp型クラッド層とを備え、前記Al₁組成x、前記濃度 N_{Mg} 、前記単結晶層のマグネシウム濃度 N_{Mg} c m⁻³、厚み d_1 及び厚み d_3 との間に以下の関係を有するとともに、前記半導体層をn型クラッド層として用いる請求項4記載の窒化ガリウム系半導体素子。

$$d_1 / (1600 \times x) < d_3 < 3.6 \times 10^{-3} \log N / (x + 0.02) + 0.02$$

ここで、N c m⁻³は、

$$N_{Mg} > N_{Al}$$

$N_{Mg} \leq N_{Al}$ の場合、N = $N_{Mg} - N_{Al}$ 、
N_{Mg} > N_{Al} の場合、Nは無添加のGa_{1-x}Al_xNにおけるマグネシウムのバックグラウンドレベルである。

【請求項6】 光を放出可能に構成された活性層と、

前記活性層に近接して設けられたp型クラッド層と、前記活性層に近接しつつ前記p型クラッド層とで前記活性層を挟むように設けられ、n型半導体とするためのn型不純物の他に、10¹⁹ c m⁻³以上の不純物濃度のMgが添加されたn-Al_{1-x}GaNクラッド層とを備えた窒化ガリウム系半導体発光装置。

【請求項7】 基板と、

前記基板に接して成長させたバッファ層と、前記基板上にエピタキシャル成長させた少なくとも1層以上のAl_{1-x}GaN層と、

前記基板に近接してエピタキシャル成長させた少なくとも1層の臨界膜厚以下の単結晶GaN層とを備え、前記少なくとも1層以上のAl_{1-x}GaN層の層厚の総和が前記基板上に成長させた全エピタキシャル層の合計層厚の5分以上を占める窒化ガリウム系半導体素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、GaN、AlGaN、InGaN等の窒素を含む半導体を有する窒化ガリウム系半導体素子及び窒化ガリウム系半導体発光装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】 近年、高密度光ディスクシステム等への応用を目的として短波長の半導体レーザの開発が進められている。この種のレーザでは記録密度を高めるために発振波長を短くすることが要求されている。短波長の半導体レーザとしてInGaNIP材料による600 nm帯光源は、ディスクの読み込み、書き込みのどちらも可能なレベルにまで特性改善され、すでに実用化されている。

【0003】 さらなる記録密度向上を目指して青色半導体レーザの開発が盛んに行われている。すでにII-VI

族系による半導体レーザは発振動作が確認された。しかしながら、付属性が100時間程度にリミットされ、波長の480 nm以下は発振が困難であるなど、実用化への障壁は多く、次世代の光ディスクシステム等への応用には材料的なリミットが数多く存在する。

【0004】一方、GaN系型半導体レーザは、350 nm以下まで短波長化が可能である。また、信頼性に関しては、条件によってはLEEDにおいて1万時間以上の信頼性が確認されるなど有望であり、盛んに研究、開発が行われている。

【0005】このように窒化ガリウム系半導体は材料的に次世代の光ディスクシステム光源に必要な条件を満たす優れた材料である。

【0006】一方、半導体レーザ形成のためには、活性層への光閉じ込め、キャリヤ閉じ込めが不可欠であり、そのためにはクラッド層としてAlGaNを使わなければならぬ。400 nm前後の光ディスクシステム等へ応用する波長を実現するためにはAl_xN組成を25%以上で、厚さも対称導波路の場合で片側0.3 μm以上が必要となる。

【0007】しかしながら、高Al組成のAlGaN層を有する半導体レーザを製作する場合には、次による問題点が生じる。

【0008】AlGaN層と、隣接するGaN層もしくは対基板との格子定数差から引っ張り歪みが生ずる。この引っ張り歪みのため、AlGaN層が臨界膜厚以上となったときには、AlGaNの表面に六角形状のクラックが入ってしまう。ここで、臨界膜厚とは、異種類の半導体層が接合されているときに、上となる半導体層に対して從となる半導体層間にクラック、転位等が生じる場合における、從なる半導体層にクラック等が生じるのは、一般に、上となる半導体層との格子定数の違いから生じる歪み等が原因であると考へられている。したがって、從なる半導体層の膜厚が臨界膜厚よりも十分小さければクラック等は生じない。また、臨界膜厚は、半導体の種類、組み合わせ、その他の条件によって異なるものである。

【0009】そもそもAlNとGaNとでは2%もの格子定数差がある。したがって、たとえ20~30%といったAl_xN組成のAlGaNとGaNと間ににおいても0.5%程度の歪が存在する。ここで、十分厚いGaN層上にAl_xNを含む層を単に成長させた場合、下地としての格子定数はGaNのそれに支配される。したがって、AlGaN層には引っ張り歪みが導入されてしまい、臨界膜厚以上はクラック無しには構成することができない。具体的には、クラッド層の光閉じ込めに必要なAlGaN層の0.2~0.5 μmといった厚さは主となるGaN層に対する臨界膜厚を越えており、通常の条件ではクラックが生じる。

【0010】クラックが生じると、ホリに電流を積荷方向に流すことが困難となり、このためにホリ抵抗は50 Ωを越える大きなものとなる。したがって、このようなレーザではレーザ発振自身が困難であり、たとえ発振しても、ホリの信頼性は甚しく低い。また、電流中に残留荷が原因と考えられる著しい劣化を示す。

【0011】上記場合は、窒素を含むIII-V族化合物半導体の一つである窒化ガリウムを主としてレーザへ適用する場合を説明した。しかし、窒化ガリウムは、レーザに限らず、他の発光ホリ、電子デバイス、パワーデバイスなどの半導体ホリに広く利用できる。

【0012】窒化ガリウムはバンドギャップが3.4 eVと大きく、また直接遷移型である。したがって、上記したように短波長光発ホリ用材料として有望である。さらに、窒化インジウムとの合金化などによって形成される窒化ガリウム系材料は、バンドギャップを広い範囲で制御できることから、オレンジから紫外までの発光ホリを作成するための材料として注目されている。また、大きなバンドギャップを生かした電力用ホリや、高効率動作ホリ等への応用も開拓を浴びている。

【0013】窒化ガリウム系薄膜材料の基板としては、窒化ガリウム系材料の成長のための高い温度においても安定で、しかも窒化ガリウム系材料との格子定数差の小さい材料が求められる。有機金属蒸気相成長法(MOCVD法)では、比較的良好的な表面性状が得られ、かつ直径2インチ級のウエーハ人手が容易なサファイアが、ホリ形成基板として広く用いられている。

【0014】しかし、サファイアと窒化ガリウムとの間に格子不整合が1.6%程度もあるため、サファイア基板を用いた場合には窒化ガリウムが島状に成長しやすい。また、このような薄膜中の転位密度が 10^{10} cm^{-2} 程度もあるため、例えば発光ホリでは発光効率が低く、動作電圧が高く、歩留まりも十分ではなかった。

【0015】例えば、サファイア基板の上に作成される窒化ガリウム系発光ダイオードで発光波長が520 nmのものは次のような特性を示す。発光効率は、電流20 mAの条件で、外部量子効率が6%、動作電圧が5 Vである。また、右記は、電流40 mAの条件で、超電圧時間1000時間での不良発生率が2.5%である。したがって、さらなる発光効率の上昇、動作電圧の低減、長寿命化が望まれている。

【0016】また、電力ホリ、高効率ホリ、高速度動作ホリ等の電子ホリの動作部であるトランジスタの形成においてもヘテロ接合部に問題があり、実用には難航している。

【0017】以上のような半導体ホリにおける陰影をもたらす大きな原因是、レーザの場合と同様に、GAl_{1-x}Al_xN層あるいはその近傍の層にしばしば発生するクラックによるところが大きい。

【0018】GAl_{1-x}Al_xN層のxを減らすことでクラックの発生の程度は小さくできるものの、例えば発光

ダイオードでは素子寿命が著しく短くなることが知られている。例えはレーザダイオードの場合には、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 層のxを減らすことによってクラックの発生の程度は小さくできるが、レーザ発振の開電流密度値が非常に高くなり、室温での連続発振が阻害される。高速動作素子の場合には、xを減らすと2次元電子ガスの形成が十分できなくなる等の悪影響が知られている。

【0019】このように従来の窒化ガリウム系半導体素子では高Al組成の $AlGaN$ 層をクラック層などとして形成するのが非常に困難で、素子抵抗が著しく高くなる。つまり、窒化ガリウム系半導体素子では、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 層のクラックを防ぐことと、素子の寿命を長くすることや動作特性を向上させることを同時に実現することができなかつた。このため、例えはレーザにおいては連続発振の実現が困難である。

【0020】

【発明が解決しようとする課題】上述したように、 GaN 、 $AlGaN$ 等の窒素を含む半導体を備えた窒化ガリウム系半導体素子においては、 Al 導入に伴う格子不整問題を回避することが半導体素子の機能を向上させる上で必要不可欠であり、その問題解決が要望されている。

【0021】本発明は、このような実情を考慮してなされたもので、 Al 導入に伴う格子不整問題を回避し、 $Ga_{1-x}Al_xN$ の厚みを薄することなくクラックの発生を防止し、かつ、 $AlGaN$ 層のAl組成を高くし、例えは活性層への光閉じ込めやキャリア閉じ込めが十分なされ得る窒化ガリウム系半導体素子及び窒化ガリウム系半導体発光装置を提供することを目的とする。

【0022】

【課題を解決するための手段】上記したように、サファイア基板等上に窒化ガリウム等の層を介して成長される $Ga_{1-x}Al_xN$ 等には、格子不整合のため界面膜厚が存在し、 Al 組成が高くなるにしたがって、界面の厚さが薄くなる。これは高い Al 組成を得ようとすると、クラックが発生しやすくなるということに対応しており、材料物性的な懸念のせいであろうと考えられてきた。

【0023】しかし、発明者はが実施した、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 層へのマグネシウムおよび珪素の添加実験の結果によると、xが大きいほどクラックが発生しやすい傾向はあるものの、マグネシウム添加量が多いほどクラックの発生を抑制できることを見出した。この効果は、珪素添加にも見られたが、マグネシウム添加による効果の方が大きかった。

【0024】つまり、 Mg をドープした $AlGaN$ 層は、アンドロープあるいは Si ドープのn型 $AlGaN$ よりもクラックを発生することなく厚く成長できる。その効果は良い現象を示し、従来より20%から50%程度膜厚を厚くすることができた。 Mg の不純物濃度としては $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ から $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の範囲でこ

の効果が明確に出現した。この効果の理由は明らかにはなっていないが、 Mg を高濃度ドープした時に AlN 、 $AlGaN$ の表面モフォロジーが変化することから考察すると、 Mg ドープ自体が結晶成長のモードに影響を及ぼしているものと考えられる。本来六方晶系結晶においては、成長面に垂直方向に軸位が入り易いなど理由による結晶方向の結晶の脆弱などをきっかけに、クラックが通常論じられている臨界膜厚以下で発生しているとすれば、添加される Mg は横方向、2次元成長をエンハンストする形でクラックを抑制している、とも解釈できる。

【0025】一方、発明者は、サファイアなどの基板上に成長させたナイトライド系半導体素子の構成に関して、 $AlGaN$ 層の膜厚を完全にキセキシリル層厚の半分以下にすれば、構造の支配的な格子定数が $AlGaN$ 層のものになることを見出だした。したがって、 $AlGaN$ 層の厚さを調整すれば、 Al 導入に伴う格子不整により $AlGaN$ 層にクラック等が発生するのを防止できることになる。

【0026】本願の各発明は上記発見に基づくものであ

り、より具体的には、以下の解決手段により実現される。

【0027】まず、請求項1に対応する発明は、基板と、基板に近接して設けられ、マグネシウム濃度 $N_{Mg} = 1 \text{ cm}^{-3}$ の窒化ガリウムを主成分とした厚み d_1 、 μm の単結晶層と、基板とで単結晶層を挟む位置に設けられ、濃度 $N_{Mg} = 1 \text{ cm}^{-3}$ のマグネシウムが添加されるとともに、 Al 組成 x が 0.2 以上 1 以下となる厚み d_2 、 μm の $Ga_{1-x}Al_xN$ を主成分とする半導体層とを備え、 Al 組成 x 、濃度 N_{Mg} 、濃度 N_{Mg} 、厚み d_1 、及び厚み d_2 との間に以下の関係を有する窒化ガリウム系半導体素子である。

【0028】 $d_1 / (1600 \times x) < d_2 < 3.6 \times 10^{-3} \times \log N / (x + 0.02) + 0.02$

ここで、 $N \text{ cm}^{-3}$ は、 $N_{Mg} > N_{Mg}$ の場合、 $N = N_{Mg} - N_{Mg}$ 、 $N_{Mg} \leq N_{Mg}$ の場合、 N は無添加の $Ga_{1-x}Al_xN$ におけるマグネシウムのパックグラウンドレベルである。

【0029】このような条件を満たす窒化ガリウム系半導体素子においては、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 層およびその近傍の層において、 $Ga_{1-x}Al_xN$ の厚みを薄することなくクラックの発生を防ぐことができる。したがって、この窒化ガリウム系半導体素子により発光ダイオードを形成したときには発光効率の向上及び動作電圧の低減化を図ることができ、また、レーザダイオードを形成したときには室温連続発振の長寿命化、さらに、電子素子を形成したときには動作特性の向上をはかることができる。

【0030】次に、請求項2に対応する発明は、請求項1に対応する発明において、レーザ発振可能に構成された活性層と、活性層に近接して設けられたn型 $AlGaN$ 層

50

N層とを備え、活性層に近接する半導体層と、n型A₁G_aN層とによって活性層が挟まれるように配置され、かつ、半導体層の層厚をn型A₁G_aN層の層厚よりも厚くした窒化ガリウム系半導体素子である。

【0031】このような構成を設けたことにより、請求項2に対応する発明が設けたことにより、請求項1に対応する発明と同様な作用効果を奏する他、半導体層の層厚をn型A₁G_aN層の層厚よりも厚くしたことにより、マグネシウム添加によるクラック発生防止効果を最大限利用することができ、より一層に活性層への光閉じ込めやキャリア閉じ込めが十分なされた、また空域連続発振の長寿命化がなされた半導体レーザを提供することができる。

【0032】また、請求項3に対応する発明は、請求項1に対応する発明において、レーザ発振可能に構成された活性層と、活性層に近接して設けられたn型A₁G_aN層とを備え、活性層に近接する半導体層と、n型A₁G_aN層とによって活性層が挟まれるように配置され、かつ、半導体層のAl₁組成をn型A₁G_aN層のA₁組成よりも高くした窒化ガリウム系半導体素子である。

【0033】このような構成を設けたことにより、請求項3に対応する発明の窒化ガリウム系半導体素子においては、請求項1に対応する発明と同様な作用効果を奏する他、半導体層のAl₁組成をn型A₁G_aN層のA₁組成よりも高くしたことにより、マグネシウム添加によるクラック発生防止効果を最大限利用することができ、より一層に活性層への光閉じ込めやキャリア閉じ込めが十分なされた、また空域連続発振の長寿命化がなされた半導体レーザを提供することができる。

【0034】さらに、請求項4に対応する発明は、基板と、基板に近接して設けられ、珪素濃度N_{Si} < c₁ cm⁻³の窒化ガリウムを主成分とした厚みd₁ μmの単結晶層と、基板とで単結晶層を挟む位置に設けられ、濃度N_{Al} cm⁻³の珪素が添加されるとともに、Al₁組成x > 0.02以上1以下となる厚みd₂ μmのG_a_{1-x}A_{1-x}N層をAl₁組成x、濃度N_{Al}、濃度N_{Si}、厚みd₁及び厚みd₂との間に以下の関係を有する窒化ガリウム系半導体素子である。

【0035】d₁ / (1600 × x) < d₂ < 3.2 × 10⁻³ × logN' / (x + 0.02) + 0.02

ここで、N' (cm⁻³) は、N_{Si} > N_{Si}の場合、N' = N_{Si} - N_{Si}、N_{Si} ≤ N_{Si}の場合、N'は無添加のG_a_{1-x}A_{1-x}Nの珪素のバックグラウンドレベルである。

【0036】このような条件を満たす窒化ガリウム系半導体素子においては、G_a_{1-x}A_{1-x}N層およびその近傍の層において、G_a_{1-x}A_{1-x}N層の厚みを薄すことなくクラックの発生を防ぐことができる。したがって、この窒化ガリウム系半導体素子により発光ダイオードを形成したときには発光効率の向上及び動作電圧の低減化

を図ることができ、また、レーザダイオードを形成したときには空域連続発振の長寿命化、さらに、電子素子を形成したときには動作特性の向上をはかることができる。

【0037】さらにまた、請求項5に対応する発明は、請求項4に対応する発明において、単結晶層とで半導体層を挟む位置に設けられ、かつ光を放出可能に構成された活性層と、半導体層とで活性層を挟む位置に設けられ、濃度N_{Si} cm⁻³のマグネシウムが添加されるとも

に、Al₁組成x > 0.02以上1以下となる厚みd₃ μmのG_a_{1-x}A_{1-x}Nを主成分とするp型クラッド層とを備え、Al₁組成x、濃度N_{Al}、単結晶層のマグネシウム濃度N_{Si} cm⁻³、厚みd₁、及び厚みd₂との間に以下の関係を有するとともに、半導体層をn型クラッド層として用いる窒化ガリウム系半導体素子である。

【0038】d₁ / (1600 × x) < d₂ < 3.6 × 10⁻³ × logN' / (x + 0.02) + 0.02

ここで、N' cm⁻³は、N_{Si} > N_{Si}の場合、N' = N_{Si} - N_{Si}、N_{Si} ≤ N_{Si}の場合、N'は無添加のG_a_{1-x}A_{1-x}Nにおけるマグネシウムのバックグラウンドレベルである。

【0039】このような構成を設けたことにより、請求項5に対応する発明の窒化ガリウム系半導体素子においては、請求項1に対応する発明と請求項4に対応する発明との作用効果が組み合わされることとなり、より一層素子特性の向上を図ることができる。

【0040】一方、請求項6に対応する発明は、光を放山可能に構成された活性層と、活性層に近接して設けられたp型クラッド層と、活性層に近接しかつp型クラッド層とで活性層を挟むように設けられ、n型半導体とするとためのn型不純物の他に、10¹⁹ cm⁻³以上の不純物濃度のMgが添加されたn-A₁G_aNクラッド層とを備えた窒化ガリウム系半導体発光素子である。

【0041】このような構成を設けたことにより、請求項6に対応する発明の窒化ガリウム系半導体素子においては、本来p型半導体を作成するためのマグネシウムをn型半導体に添加し、n型半導体では十分に得られないクラック抑制効果をn型半導体においても得られるようした。したがって、n-A₁G_aNクラッド層においても十分にクラック発生を抑制できる窒化ガリウム系半導体発光素子を提供することができる。

【0042】次に、請求項7に対応する発明は、基板と、基板に沿して成長させたパッファ層と、基板上にエビタキシャル成長させた少なくとも1層以上のA₁G_aN層と、基板に近接してエビタキシャル成長させた少なくとも1層のGaN層の界面以下の単結晶GaN層とを備え、少なくとも1層以上(A₁G_aN層の層厚の総和が基板上にて成長させたエビタキシャル層の合計層厚の半分以上を占める窒化ガリウム系半導体素子である。

【0043】このような構成を設けたことにより、請求

項7に対応する発明の窒化ガリウム系半導体素子においては、まず、AIGaN層の層厚の総和がエピタキシャル層の全層厚の半分以上を占めている。

【0044】これにより、エピタキシャル層を支撐する格子定数をAIGaN層のものとすることで、格子不整によるAIGaN層におけるクラック発生等を防止することができる。

【0045】また、基板と接して設けられたバッファ層により、基板と窒化ガリウム系半導体との格子不整合を解消できる。このとき、バッファ層は低層成長させたアモルファス層となっていることが、より望ましい。

【0046】次に、単結晶GaN層によって、支配方的な格子定数がAIGaN層のものである場合の格子定数差が吸収される。このとき当該GaN層には格子定数差による上彎曲みが生じているが、GaN層が単結晶であり、また、臨界膜厚以下であることによって、当該GaN層における新たな転位、クラック等の発生は防止される。

【0047】さらに、この単結晶GaN層は、基板もしくはバッファ層との格子不整をも緩和し、結晶表面の平坦性も改善し、良好なAIGaN層の成長を可能ならしめている。

【0048】したがって、高AIGaN層をケラット層として窒化ガリウム系半導体素子に用いることができ、素子抵抗が十分に低く、製造方法も簡単な優れた窒化ガリウム系半導体素子が提供できる。特に半導体レーザにおいては、低しきい値のみならず、信頼性も向上しめる大きな効果がある。

【0049】なお、上述した課題を解決する手段としては、上記手段の他、以下の内容をも含む。

【0050】(1) 前記活性層を挟む前記半導体層及び前記n型AIGaN層はそれぞれケラット層をなし、前記活性層と各クラッド層との間の少なくとも一方に、前記活性層と前記クラッド層との中間的なバンドギャップを有する光ガイド層を備え、前記光ガイド層の厚さ及び組成を調整することで両クラッド層の厚さの違いにより生じる光学的非対称性を補正する請求項2記載の窒化ガリウム系半導体素子。

【0051】(2) 前記活性層を挟む前記半導体層及び前記n型AIGaN層はそれぞれクラッド層をなし、前記活性層と各クラッド層との間の少なくとも一方に、前記活性層と前記クラッド層との中間的なバンドギャップを有する光ガイド層を備え、前記光ガイド層の厚さ及び組成を調整することで両クラッド層のAIG組成の高さの違いにより生じる光学的非対称性を補正する請求項3記載の窒化ガリウム系半導体素子。

【0052】(3) 光を放光可能に構成された活性層と、d型クラッド層として用いられる前記半導体層とで前記活性層を挟むように設けられ、かつn型半導体とするためのn型不純物の他に、 10^{19} cm^{-3} 以上の不純物

濃度のMgが添加されたn-AIGaNクラッド層とを備えた請求項1記載の窒化ガリウム系半導体素子。

【0053】(4) 前記基板上にて成長させた前記半導体層を含むエピタキシャル層のうち、少なくとも前記半導体層を有する全AIGaN層の層厚の総和が前記エピタキシャル層の全層厚の半分以上を占める請求項1記載の窒化ガリウム系半導体素子。

【0054】(5) 前記基板上に接してエピタキシャル成長させたバッファ層を備え、前記単結晶層は臨界膜厚以下である上記(4)記載の窒化ガリウム系半導体素子。

【0055】(6) 前記活性層はレーザ発光可能に構成されており、前記n型クラッド層には 10^{19} cm^{-3} 以上の不純物濃度のMgが添加された請求項5記載の窒化ガリウム系半導体素子。

【0056】(7) 前記基板上にて成長させた前記半導体層を含むエピタキシャル層のうち、少なくとも前記半導体層を有する全AIGaN層の層厚の総和が前記エピタキシャル層の全層厚の半分以上を占める請求項4記載の窒化ガリウム系半導体素子。

【0057】(8) 前記基板に接して成長させたバッファ層を備え、前記単結晶層は、臨界膜厚以下である上記(7)記載の窒化ガリウム系半導体素子。

【0058】(9) 前記活性層はレーザ発光可能に構成されており、前記d型クラッド層の層厚を前記n型クラッド層の層厚よりも厚くした請求項6記載の窒化ガリウム系半導体発光装置。

【0059】(10) 前記活性層はレーザ発光可能な構成されており、前記p型クラッド層のAIG組成を前記n型クラッド層のAIG組成よりも高くした請求項6記載の窒化ガリウム系半導体発光装置。

【0060】(11) 前記活性層と各クラッド層との間の少なくとも一方に、前記活性層と前記クラッド層との中間的なバンドギャップを有する光ガイド層を備え、前記光ガイド層の厚さ及び組成を調整することで両クラッド層の厚さの違いにより生じる光学的非対称性を補正する上記(9)記載の窒化ガリウム系半導体発光装置。

【0061】(12) 基板にて成長させたエピタキシャル層を有する窒素を含む化合物半導体素子において、少なくとも1層以上のAIGaN層を有し、このAIGaN層の層厚の総和が前記エピタキシャル層の全層厚の半分以上を占めることを特徴とする窒素を含む化合物半導体素子。

【0062】(13) 前記基板と接して設けられたバッファ層と、前記基板と前記AIGaN層間で当該AIGaN層に接して、もしくは、前記AIGaN層中に設けられた少なくとも1層の臨界膜厚以下の単結晶GaN層とを有する上記(12)記載の窒素を含む化合物半導体素子。

【0063】(14) 前記エピタキシャル層が酸化物からなる粘板上に設けられている上記(12)記載の窒素

を含む化合物半導体素子。

【0064】(15)前記基板がサファイアである上記(14)記載の窒素を含む化合物半導体素子。

【0065】(16)前記(1)～(15)のうち何れかに記載の窒素を含む化合物半導体発光素子。

【0066】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照しながら実施の形態を説明する。

【0067】サファイア基板上に窒化ガリウム等の層を介して成長される $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ には、格子不整合のため、ある組成 x において対応するクラック発生の起こらない限界の厚み、つまり臨界膜厚が存在する。 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ の x が大きくなると組成が高くなるにしたがって、限界の厚さが薄くなる。これは高い Al 組成を得ようすると、クラックが発生しやすくなるということに対応しており、材料物性的な限界のせいであろうと考えられてきた。

【0068】確かに、この傾向は本発明者等の実験でも再現されており、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層の膜厚を薄くするとクラックの発生は減少していくことが確認できている。

【0069】また、別途実施した、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層へのマグネシウムおよび珪素の添加実験の結果を整理してみると、 x が大きいほどクラックが発生しやすい傾向は同じであるが、マグネシウム添加量が多いほどクラックの発生を抑制できることを見出した。この効果は、珪素添加にも見られたが、マグネシウム添加による効果の方が大きかった。

【0070】つまり、 Mg をドープした $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{N}$ 層は、アンドープあるいは Si ドープの n 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{N}$ よりもクラックを発生することなく成長できる。その効果は良い再現性を示し、従来より 20% から 50% 程度膜厚を薄くすることができた。 Mg の不純物濃度としては $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ から $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の範囲でこの効果が明確に出現した。この効果の理由は明らかにはなっていないが、 Mg を高濃度ドープした時に Ga_yN 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{N}$ の表面モフォロジーが変化することから考察すると、 Mg ドープ自体が晶片成長のモードに影響を与えるものと考えられる。本来六方晶系結晶においては、成長面に垂直方向に軸位が入り易いなどの理由による観察方向の結晶の晶洞さなどをさっかに、クラックが通常観察している臨界膜厚以下で発生しているとすれば、添加される Mg が構成方向、2 次元成長をエンハンストする形でクラックを抑制している。とも解釈できる。

【0071】図 1 は本発明の実施の形態の結晶成長に用いる有機金属気相成長装置の概略構成図である。

【0072】図 1において、この有機金属気相成長装置においては、石英製の成長容器 301 のガス導入口 302 から原料ガスを供給し、ガス排出口 303 よりガスを

排出する構成になっている。また、グラファイト製のサセプタ 304 は高周波加熱装置 305 によって加熱され、サセプタ 304 の温度は、W 热電対 306 によって測定及び制御される。基板 307 はサセプタ 304 の上に直接置かれ、加熱される構成をとっている。

【0073】このような構成の気相成長装置を用い、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層の組成と膜厚とを種々変更し、かつマグネシウムもしくは珪素の添加量を種々変更した試料を作成した。そして作成した各試料のクラック発生の状況を調査した。この結果を図 2 及び図 3 に示す。

【0074】図 2 は、マグネシウムを添加した場合における、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層の組成及び膜厚と、クラック発生との関係を示す図である。

【0075】図 3 は、珪素を添加した場合における、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層の組成及び膜厚と、クラック発生との関係を示す図である。

【0076】各図において、丸印がクラックの発生しなかった試料であり、白丸はクラックが光学顕微鏡により認められた場合を示す。図 2 に示す結果は種々のマグネシウム添加量の試料が混在しており、各試料のマグネシウム濃度は $5 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の範囲内にある。一方、図 3 に示す結果は種々の珪素添加量の試料が混在しており、各試料の珪素濃度は $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の範囲内にある。

【0077】マグネシウムもしくは珪素を添加すれば、マグネシウムもしくは珪素を添加しない場合よりも、クラックを起こすことなく成長できる $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層の膜厚を厚くできることは、先に述べた通りであるが、マグネシウムもしくは珪素を添加した場合でも、図 2、

図 3 より各要因に応じた関係があることがわかる。

【0078】また、図 2、図 3 では特に表示しないが、同じ機の実験をさらいに、その結果を整理したところ、マグネシウムあるいは珪素の添加量が多いほどクラック抑制効果は大きく、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層の下地の層の厚みが薄いほどクラックは発生しにくいことが判明した。ここでいう下地の層というのは、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層に対し直接接している層に限らず、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層に對して上にのみを発生させ得る層である。したがって、F 地の層に比較的薄い他の層を介してここで示す $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層が設けられることもある。

【0079】このようなクラック抑制効果は、他の III-V 族化合物半導体である窒化ガリウムの結晶成長時にインジウム、珪素等を添加すると位相の発生や成長を抑制できる効果と類似の効果ではないかと考えられる。

【0080】また、本発明者等は、下地への元素添加も $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層のクラック発生に関係があることを出した。

【0081】一方、実際に $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ 層を $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) の接合によって半導体素子を作成する場合には、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ の Al 組成 x

値として0.02以下でないと、その効果はほとんど無いことが別途検討した結果より明らかになっている。

【0082】これらの実験結果を統合し、クラック発生にどの項目がどのように係わっているのかを理解するために、マグネシウムや珪素の添加量、下地の厚み、下地のマグネシウムや珪素の濃度、Al_xN成それぞれの影響度を数値化しておく必要がある。また、Ga_{1-x}Al_xN層の成長においては、その成長条件によっては成長面上に穴の発生が認められることがある。このような穴の存在は、製造されるべき半導体素子に對し好ましくない影響を与えることがあるので、この穴の発生しない成長条件も検討しておく必要がある。以下に、クラック及び穴の発生条件の数値化について、その検討手順を示す。

【0083】サファイア基板の上に核形成層を介して成長したGaN（以下、下地のGaNと称する）の厚みが変化すると、当該GaN上に成長するGa_{1-x}Al_xN層の成膜が変化することが見出されている。そこで、図1に示す装置を用い、下地のGaNの厚みを種々変化させた上にGa_{1-x}Al_xN層のxおよび膜厚（成長時間）を変化させた試料を成長させた。

【0084】試料成長後、Ga_{1-x}Al_xN層が目標で平坦かつ緻密であって、かつ走査型電子顕微鏡観察による表面の観察でも穴の存在が認められない限界を調べた。

【0085】xが同じGa_{1-x}Al_xN層の場合、Ga_{1-x}Al_xN層が薄いときに走査型電子顕微鏡観察による表面の観察で穴の存在が認められ、また、xが同じ場合

$$d_x / 1600 < x d_x \quad (0.02 \leq x \leq 1) \quad \dots (1)$$

つまり、Ga_{1-x}Al_xN層の厚みがある程度以上であれば、上記穴の発生を防止できる。具体的には、図4～図6に示されるように各組成xにおいて（1）式に示す等々の方向で穴の発生をなくすことができる。

【0090】この関係式は、下地のGaNあるいはGa_{1-x}Al_xNへの添加不純物種あるいは添加量には影響を受けずに成り立っていることが、少なくともマグネシウム添加及び珪素添加の場合には確認された。

【0091】次に、クラックの発生と種々の要因について述べる。組成xが高いほどクラックが発生しない限界厚みが薄いことは広く知られている。この関係は、実験結果を積みた結果、反比例で近似すると非常に良く実験結果を説明できることがわかった。

【0092】また、マグネシウムあるいは珪素を添加することで、クラックの発生が抑制できることは前述の通りであるが、下地のGaN中におけるGa_{1-x}Al_xN層中と同種の不純物濃度（マグネシウムあるいは珪素）が高いと、この効果が弱めてしまうことを突き止めた。すなわち下地のGaN中とGa_{1-x}Al_xN中と同種の不純物が存在すると、その差分だけがクラック防止に効いているということである。従って、Ga_{1-x}Al_xN

* 合、下地のGaN層が薄いときにも同様の現象が見られた。このような穴が存在すると、例えば添加不純物種がそこで析出を起こしたり、あるいは穴を通過して異常拡散を起こし、穴が素子の劣化をもめる要因として働く。したがって、長寿命化へ向けた条件設定としては、この穴はあってはならないものであると判断した。

【0086】上記実験の結果、xが大きい（Al_xN成が高）場合には、膜厚に比例して上記穴の発生が顕著になり、xを下げるによって、同じ膜厚、あるいは下地のGaNとの厚みの比が同じでも上記穴の発生の限界膜厚が上がる事がわかった。この実験結果を図4、図5、図6に示す。

【0087】図4は、Ga_{1-x}Al_xN層の厚さ及びAl_xN成とGaN層の厚さとの関係を示す図であり、図5は、Ga_{1-x}Al_xN層の厚さ及びAl_xN成とGaN層の厚さとの関係を示す図である。また、図6は、Ga_{1-x}Al_xN層の厚さ及びAl_xN成とGaN層の厚さとの関係を示す図である。

【0088】図4～図6の実験結果をもとにフィッティングを行い、穴が発生しない条件式で表すことを検討する。すなわち、Ga_{1-x}Al_xN層が目標で平坦かつ緻密であって、かつ走査型電子顕微鏡観察による表面の観察でも穴が見られない条件は、下地のGaN層の厚みをd_x（μm）、Ga_{1-x}Al_xN層の厚みをd_x（μm）としたときに、以下の関係があることがわかった。

【0089】

30 0.02 ≤ x ≤ 1) $\dots (1)$
N中にマグネシウムが添加されており、下地のGaNに珪素のみが添加されている場合には、単にマグネシウム濃度でクラック防止効果が説明できる。

【0093】一方、下地のGaN中の方が高い不純物濃度を持つ場合には、Ga_{1-x}Al_xN中の不純物濃度、組成、膜厚によらず不純物添加によるクラック発生の限界膜厚が、無添加のGa_{1-x}Al_xNの場合と変化がないことが分かった。

【0094】図7はマグネシウムを添加して作成した試料における、Ga_{1-x}Al_xN層の組成及び膜厚と、クラック発生との関係を示す図である。

【0095】同図は、種々のマグネシウム添加量の試料を含む図2に示す実験結果から、マグネシウム濃度 5×10^{-10} (cm⁻³) の場合の結果を抜き取って、また同濃度の異なる実験結果を追加して表示したものである。なお、黒丸がクラックの発生しなかった試料であり、白丸はクラックが光学顕微鏡により認められた場合を示す。

【0096】同図の結果よりクラックの発生しない条件を数値化する。Ga_{1-x}Al_xNにマグネシウムが添加されている場合には、以下の式でクラック発生の起こらないGa_{1-x}Al_xN膜厚d_xが表わされることが同図

50

に示すフィッティングより、明らかである。すなわち、添加不純物がマグネシウムの場合、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 中 $* d_x < 3.6 \times 10^{-3} \times \log N / (x \times 0.02) + 0.02$ である。ここで、 $N (cm^{-3})$ は、 $N_{sub} > N_{het}$ の場合

$N = N_{sub} - N_{het}$ 、 $N_{sub} \leq N_{het}$ の場合、 N は無添加の $Ga_{1-x}Al_xN$ ($0.02 \leq x \leq 1$) のマグネシウムのパックグラウンドレベルである。なお、特に図示しないが、図 2 における各マグネシウム濃度の場合でも上記 (2) 式が成り立つことが確認されている。具体的には、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 中のマグネシウム濃度 N_{sub} の大きさに応じて図 2 中に示されるフィッティングライン ($d_x = 3.6 \times 10^{-3} \times \log N / (x \times 0.02) + 0.02$) と同様なラインの位置が図 2 中で上下にずれることとなる。マグネシウム濃度が高ければ、フィッティングラインは上方に移動し、マグネシウム濃度が低ければ、フィッティングラインは下方に移動する。

【0097】一方、図 8 は、珪素を添加して作成した試験

$$d_x < 3.2 \times 10^{-3} \times \log N' / (x + 0.02) + 0.02 \quad \cdots (3)$$

である。ここで、 $N' (cm^{-3})$ は、 $N_{sub} > N_{het}$ の場合、 $N' = N_{sub} - N_{het}$ 、 $N_{sub} \leq N_{het}$ の場合、 N' は無添加の $Ga_{1-x}Al_xN$ ($0.02 \leq x \leq 1$) の珪素のパックグラウンドレベルである。なお、特に図示しないが、図 3 における各珪素濃度の場合でも上記 (3) 式が成り立つことが確認されている。具体的には、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 中の珪素濃度 N_{sub} の大きさに応じて図中に示されるフィッティングライン ($d_x = 3.2 \times 10^{-3} \times \log N' / (x + 0.02) + 0.02$) と同様なラインの位置が図 3 中で上下にずれることとなる。珪素濃度が高ければ、フィッティングラインは上方に移動し、珪素濃度が低ければ、フィッティングラインは下方に移動する。

【0100】このように、クラックの発生が起る $Ga\star$

$$d_x / (1600 \times x) < d_x < 3.6 \times 10^{-3} \times \log N / (x + 0.02) + 0.02 \quad \cdots (4)$$

ここで、 $N (cm^{-3})$ は、 $N_{sub} > N_{het}$ の場合、 $N = N_{sub} - N_{het}$ 、 $N_{sub} \leq N_{het}$ の場合、 N は無添加の $Ga_{1-x}Al_xN$ ($0.02 \leq x \leq 1$) のマグネシウムのパックグラウンドレベルである。

【0103】一方、添加不純物が珪素の場合には (1) 式

$$d_x / (1600 \times x) < d_x < 3.2 \times 10^{-3} \times \log N' / (x + 0.02) + 0.02 \quad \cdots (5)$$

ここで、 $N' (cm^{-3})$ は、 $N_{sub} > N_{het}$ の場合、 $N' = N_{sub} - N_{het}$ 、 $N_{sub} \leq N_{het}$ の場合、 N' は無添加の $Ga_{1-x}Al_xN$ ($0.02 \leq x \leq 1$) の珪素のパックグラウンドレベルである。

【0105】なお、上記各式で不等号 " $<$ " を用いて条件を設定したのは、穴やクラックが確実に発生しないよう安全サイドを取ったものである。

【0106】このように本発明の実施の形態に係る半導体素子によれば、 $Ga_{1-x}Al_xN$ を主成分とする層を含む窒化ガリウム系半導体積層構造において、マグネシ

* のマグネシウム濃度 N_{sub} (cm^{-3}) と、下地の GaN 中のマグネシウム濃度 N_{het} (cm^{-3}) との関係で、

※料における、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 層の組成及び膜厚と、クラック発生との関係を示す図である。

【0098】同図は、種々の珪素添加量の試料を含む図 3 に示す実験結果から、珪素濃度 $3 \times 10^{14} (cm^{-3})$ の場合の結果を抜き取って、また同濃度の異なる実験結果を追加して表示したものである。なお、黒丸がクラックの発生しなかった試料であり、白丸がクラックが光学顕微鏡により認められた場合を示す。

【0099】同図の結果よりクラックの発生しない条件を上記場合と同様に数式化すると、添加不純物が珪素の場合には、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 中の珪素濃度 N_{sub} (cm^{-3}) と、下地の GaN 中の珪素濃度 N_{het} (cm^{-3}) との関係で、

★ $* \cdot Al_xN$ 層の厚さと、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 層及び下地へのマグネシウムあるいは珪素の添加量との関係が明確となった。

【0101】以上をまとめると、走査型電子顕微鏡観察による表面の観察でも穴の存在が認められず、かつクラックの発生の起らない窒化ガリウム系半導体素子を実現するための $Ga_{1-x}Al_xN$ 層 d_x の範囲は、マグネシウム添加の場合 (1) 式及び (2) 式より、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 中のマグネシウム濃度 N_{sub} (cm^{-3}) と下地の GaN 中のマグネシウム濃度 N_{het} (cm^{-3}) との関係で、以下の式の範囲にあれば良い事がわかった。

30 【0102】

★式及び (3) 式より、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 中の珪素濃度 N_{sub} (cm^{-3}) と、下地の GaN 中の珪素濃度 N_{het} (cm^{-3}) との関係で、以下の式の範囲にあれば良い事がわかった。

【0104】

$$d_x / (1600 \times x) < d_x < 3.2 \times 10^{-3} \times \log N' / (x + 0.02) + 0.02 \quad \cdots (5)$$

ウム添加の $Ga_{1-x}Al_xN$ ($0.02 \leq x \leq 1$) 層の厚み d_x (μm) と、組成 x と添加されたマグネシウム濃度 N_{sub} と、基板に最も近接した窒化ガリウムを主成分とする単結晶層の厚み d_1 と、当該窒化ガリウムを主成分とする単結晶層のマグネシウム濃度 N_{het} (cm^{-3}) との関係が (4) 式を満たしていれば、穴の存在が認められず、かつクラックの発生の起らない窒化ガリウム系半導体素子を実現することができる。

【0107】また、本発明の実施の形態に係る半導体素子によれば、 $Ga_{1-x}Al_xN$ を主成分とする層を含む

電化ガリウム系半導体構造において、珪素添加の $G_{a_{1-x}Al_xN}$ の厚み d_1 (μm) と、銀 c と添加された珪素濃度 N_{Si} と、基板に最も近接した電化ガリウムを主成分とする単結晶層の厚み d_2 と、当流電化ガリウムを主成分とする単結晶層の珪素濃度 N_{Si} ($c m^{-3}$) の関係が (5) 式を満たしていれば、穴の存在が認められず、かつクラックの発生の起こらない電化ガリウム系半導体素子を実現することができる。

【0108】このように本発明の実施の形態に係る半導体素子によれば、 $G_{a_{1-x}Al_xN}$ 層および近傍の層ににおいて、 $G_{a_{1-x}Al_xN}$ 層の厚みを薄くして、電子顕微鏡で見られるような穴を発生させてしまう恐れが無く、かつ從来ではクラックの発生する条件でもクラックの発生を抑制することができる。したがって、発光ダイオードでは発光効率の向上、動作電圧の低減化及びレーザーダイオードでは電流連続発振の長寿命化、電子素子では劣化の様子が從来の素子に比べて飛躍的に改善され、また動作特性の向上をはかり得る。従って、長寿命の半導体素子を実現することができる。

【0109】(第1の実施の形態) 本実施の形態では、上記見出された (4) 式及び (5) 式を満たす条件で発光ダイオードの作製を行い、その素子特性を調べた。発光ダイオードは図 1 に示した有機金属気相成長装置を用いて作製された。

【0110】図 9、図 10 および図 11 は、本発明の第1の実施の形態の発光ダイオードの $\times 100$ 倍断面図である。

【0111】図 1 の気相成長装置において、ガス導入口 302 から水素を供給しながら高周波加熱装置 305 に通電を開始し、セバタ 304 の上に置いた基板 307、すなわち図 9 におけるサファイア基板 401 を加熱し、熱電対 306 の指示が 1200°C になるように調整した。以下、熱電対 306 の指示を単に温度と称する。この温度で 10 分保持してから温度を 600°C まで下げ、安定したところにトリメチルガリウム (以下 TMG と略する) とトリメチルアルミニウム (以下 TMA と略する) およびアンモニアガスの供給を開始し、 $G_{a_{1-x}Al_xN}$ バッファー層 402 の成長を 30 nm 行った。その後、TMA と TMG の供給を停止し、温度を 1200°C に再上昇させた。

【0112】次いで、水素で希釈したシランガスと TMG の供給を開始し、珪素添加の n 型 GaN 層 403 を 4 μm 成長させた。その後、TMG、シランの供給を停止し、温度を 800°C まで下げ、安定してから TMA と TMG を供給し、もう 1 系統用意した TMA と TMG のラインを用いて井戸層 $In_{0.05}Ga_{0.95}N$ および障壁層 $In_{0.05}Ga_{0.95}N$ の 20 Å からなる多電層子井戸 (MQW) 構造活性層 404 を作成した。TMG の供給を停止してから温度を 1200°C に戻し、安定した所でビスシリコンバングエニルマグネシウム (以下 Cp_2Mg と略する) と TMA を追加供給してマグネシウム添加の p 型

$G_{a_{1-x}Al_xN}$ 層 405 を 0.3 μm 成長させた。【0113】統一して、TMA の供給を停止してそのままマグネシウム添加の p 型 GaN 層 406 を 1 μm 成長させた。その後、 Cp_2Mg の供給を停止すると同時に水素で希釈したシランガスを供給して n 型の GaN 層 407 を 0.05 μm 成長させた。

【0114】その後、TMG とシランガスの供給を停止し、高周波加熱装置 305 への通電を停止した。温度が 850°C まで下がったところでアンモニアの供給を停止した。

【0115】成長容器 301 から取り出したウエーハを自視検査したところ、鏡面であった。微分干涉顕微鏡で観察しても、特徴的な表面状態のパターンは見られなかった。すなわち、ウエーハ全面でクラックは見られなかった。また、図 9 の状態で走査型電子顕微鏡で表面状態を観察したが、平坦であり、穴、突起物、うねり等の特徴的なパターンは見られなかった。

【0116】以上のようにして得られたウエーハの全面を反応性イオンエッチングによってマグネシウム添加の p 型 GaN 層 406 まで処理した。

【0117】次に、断面電子顕微鏡観察によって確認した最表面から n 型 GaN 層 403 までの距離を基にしてエッチング条件を決定し、 SiO_2 膜をマスクに用いた反応性イオンエッチングによって、図 10 に示すようにウエーハの一部を珪素添加の n 型 GaN 層 403 まで削った。

【0118】次に、図 11 に示すように、 n 型の T1 と A1 の合金の電極 408 および p 型の垂亜と A1 の合金の電極 409 を形成した。特に熟処理を行なうことなく n 型、 p 型共に良好なオーム性接觸を実現していることを確認した。

【0119】以上のようにして作成した発光ダイオードは、下地の GaN 層 403 は 4 μm の厚みがある。 $G_{a_{1-x}Al_xN}$ 層 405 はマグネシウム添加で、 x 値は 0.15、膜厚は 0.3 μm である。また、2 次イオン質量分析によるマグネシウム濃度の測定結果から、

(4) 式における N_{Si} は $1.2 \times 10^{19} cm^{-3}$ である。 N_{Si} はパックグラウンドレベル ($1.0 \times 10^{19} cm^{-3}$) であった。すなわち、走査型電子顕微鏡で見られる穴の発生条件は、 $1 / (1600 \times 0.15) = 0.0167$ となり、 d_2 の値 0.3 を下回っている。

【0120】(4) 式からクラックの発生条件は、 $N_{Si} > N_{Si}$ であるので、 N_{Si} は $1.2 \times 10^{19} \sim 1.0 \times 10^{19}$ は約 1.2×10^{19} である。 $3.6 \times 10^{-3} \times [10^9 (1.2 \times 10^{19})] / (0.15 + 0.02) + 0.02 = 0.42$ となり、 d_2 の値 0.3 はこれより低いことが確認できた。

【0121】また、このように光学特性を測定したところ、発光波長のピークは 420 nm であり、3.6 V という低い電圧で 20 mA まで電流を流すことができた。ま

た、発光効率は外部電子効率で13.4%と非常に高い効率が実現できた。電流10mAにて、この発光ダイオードの寿命試験を行ったところ、1000時間経過後の不良率は1%以下であり、長寿命化がはかられていることが確認された。

【0122】このように本発明の実施の形態に係る半導体発光素子によれば、(4)式の条件が成立するよう各所における添付物種類、濃度及び厚さを調整したので、発光ダイオードにおいて着しい長寿命化、さらなる発光効率の上昇、動作電圧の低減を実現することができる。

【0123】(第2の実施の形態) 本実施の形態では、上記見出された(4)式及び(5)式を満たす条件で青色レーザー・ダイオードの作製を行い、その赤色特性を調べた。青色レーザー・ダイオードは図1に示した有機金属気相成長装置を用いて作製された。

【0124】図12、図13、図14及び図15は、本発明の第2の実施の形態のレーザー・ダイオードの構造断面図である。

【0125】図1の気相成長装置において、ガス導入口1302から水素を供給しながら高周波加熱装置305に通電を開始し、セサブタ304の上に置いた基板、すなわち図12におけるサファイア基板501を加熱し、温度が1200°Cになるように調整した。この状態で10分保持してから温度を600°Cまで下げ、安定したところでTMGおよびアンモニアガスの供給を開始し、GaNバッファー層502の成長を4.0nm行った。TMGの供給を停止し、温度を1200°Cに再上昇させた。

【0126】次いで、水素で希釈したシリガスとTMGの供給を開始し、珪素添加のn型GaN層503を4μm成長させた。その後、TMAを追加供給し、n型の珪素添加のGaN_xA_{1-x}N層504を0.3μm成長させた。次に、TMAとシリガスの供給を停止し、無添加のGaN層505を0.1μm成長させた。次にTMG、シリガスの供給を停止し、温度を800°Cまで下げ、安定してからTMGを供給し、鉛塗層GaNを4nm成長させた。引き続きTMIを追加することによって井戸層1n₁n₂n₃GaN_xA_{1-x}N層506を2nm成長させた。このapse層と井戸層を繰り返し20回成長することで多量子井戸(MQW)構造活性層506を作成した。TM1の供給を停止してから温度を1200°Cに戻し、安定した所でCd_xMg_{1-x}を追加供給し、p型GaN層507を0.1μm成長させた。

【0127】次にTMAを追加供給してマグネシウム添加のp型GaN_xA_{1-x}N層508を0.3μm成長させた。統て、TMAの供給を停止してそのままマグネシウム添加のp型GaN層509を1μm成長させた。

【0128】その後、TMGとCd_xMg_{1-x}の供給を停止し、高周波加熱装置305への通電を停止した。温度が

850°Cまで下がったところでアンモニアの供給を停止した。成長容器301から取り出したウエーハを自視検査したところ、鏡面であった。微分干涉顕微鏡で観察しても、特徴的な表面状態のパターンは見られなかつた。すなわち、ウエーハ全面でクラックは見られなかつた。また、走査型電子顕微鏡で表面状態を観察したが、平滑であり、穴、突起物、うねり等の特徴的なパターンは見られなかつた。

【0129】次に前面電子顕微鏡観察によって確認した最表面からn型GaN層503までの距離を基にしてエッチング条件を決定した。そして、SiO₂膜510をマスクに用いた反応性イオンエッチングによって、図13に示すようにウエーハの一部を珪素添加のn型GaN層503まで削った。

【0130】統て、ポリイミド511を用いて直前に反応性イオンエッチングによって削った部分を埋め、次に、ウエーハ全体を削りp-GaNの表面を露出させた(図14)。その上にSiO₂膜512をマスクに用いた反応性イオンエッチングによって、ウエーハの一部を珪素添加のn型GaN層503まで削った(図15)。

【0131】この状態でT1及びA1の合金のn型電極を形成し、SiO₂膜512を取り除いてからN₁及びA₁の合金のp型電極を形成した。特に熱処理を行なうことなくn型、p型共に良好なオーム性接触を実現していることを確認した。

【0132】以上のようにして作成したレーザー・ダイオードは、下地のGaN層503は4μmの厚みがあり、G_{a1-x}A_{1-x}N層508はマグネシウム添加で、xは0.15、膜厚は0.3μmである。ここで、下地のGaN層503とG_{a1-x}A_{1-x}N層508との関係で(4)式が適用される。2次イオン質量分析によるマグネシウム濃度の測定結果から、N₁は1.2×10¹⁹cm⁻³であり、N₁はバックグラウンドレベル(1.0×10¹⁹cm⁻³)であった。

【0133】したがって、走査型電子顕微鏡で見られる(4)式の穴の発生条件は、4/(1600×0.15)=0.0167となり、d_xの値0.3を下回っている。また、N₁はN₁であるので、N₁は1.2×10¹⁹-1.0×10¹⁹=約1.2×10¹⁹である。

(4)式のクラックの発生条件は3.6×10⁻³×110g(1.2×10¹⁹)/(0.15+0.02)+0.02=0.42となり、d_xの値0.3はこれより低いことが確認できた。

【0134】また、下地のGaN層503は4μmの厚みがあり、G_{a1-x}A_{1-x}N層504は珪素添加で、x値は0.15、膜厚は0.3μmである。ここで、下地のGaN層503とG_{a1-x}A_{1-x}N層504との関係で(5)式が適用される。2次イオン質量分析による珪素濃度の測定結果から、N₁は3.6×10¹⁹cm⁻³であり、N₁はバックグラウンドレベル(3.0×10

17 cm^{-1} ）であった。

【0135】したがって、走査型電子顕微鏡で見られる（5）式の穴の発生条件は、 $4 / (1600 \times 0.1) = 0.0167$ となり、 d_x の値 0.3 を下回っている。また、 $N_{\text{sub}} > N_{\text{heat}}$ であるので、 N は $3.6 \times 10^{-3} - 3.0 \times 10^{-3} = 3.3 \times 10^{-3}$ であり、（5）式のクラックの発生条件は $3.2 \times 10^{-3} \times [\log (3.3 \times 10^{-3})] / (0.15 + 0.02) + 0.02 = 0.37$ となり、 d_x の値 0.3 はこれより低いことが確認できた。

【0136】このようにして作製した青色レーザダイオードについて、室温で特性の測定を実施した。当該レーザは、5.0 V の電圧下で 7.5 mA の電流が流れ、連続発振することが確認された。

【0137】次に、この状態で連続で試験を継続し、発振が停止するまでの寿命を測定した。寿命を測定した素子は全数で 2000 個であったが、1000 時間の寿命を示した素子は 132 個であった。

【0138】一方、本発明の方法を用いない場合は 1 枚のサファイア基板上に数多く作成されたレーザ素子の内、連続発振する素子は 1 個だけであった。このレーザは、その時 7 V、電流 9.0 mA で室温にて連続発振していたが、寿命は 1 時間以内であった。このように本実施の形態で作製した青色レーザダイオードは従来のものよりも格段の進歩していることが確認された。

【0139】このように本発明の実施の形態に係る半導体素子によれば、（4）式及び（5）式の条件が成立するように各層における添加物種類、濃度及び層厚を調整したので、レーザの室温連続発振の動作電圧、電流値の低減が図られることはもちろんのこと、寿命を飛躍的に向上させることができる。

【0140】（第 3 の実施の形態）本実施の形態では、上記見出された（4）式及び（5）式を満たす条件でさらに他の青色レーザダイオードの作製を行い、その素子特性を調べた。青色レーザダイオードは図 1 に示した有機金属気相成長装置を用いて作製された。

【0141】図 16、図 17、図 18 及び図 19 は、本発明の第 2 の実施の形態のレーザダイオードの構成図である。

【0142】図 16において、サファイア基板 601 上での GaN パッファー層 602 から p 型 GaN 層 609 成長までの工程は第 3 の実施の形態の図 12 に示す場合と同じである。p 型 GaN 層 609 を成長した後に C_pz Mg とシランガスとを切り替え、n 型 GaN 層 610 を 0.2 μm 成長させた。

【0143】その後、TMG とシランガスの供給を停止し、高周波加熱装置 305 への通電を停止した。温度が 850 °C まで下がったところでアンモニアの供給を停止した。

【0144】成長容器 301 から取り出したウエーハを

目視検査したところ、鏡面であった。微分干涉顕微鏡で観察しても、特徴的な双面状態のパターンは見られなかつた。すなわち、ウエーハ全面でクラックは見られなかつた。また、走査型電子顕微鏡で表面状態を観察したが、平坦であり、穴、突起物、うねり等の特徴的なパターンは見られなかつた。

【0145】次に断面電子顕微鏡観察によって確認した最表面から p 型 GaN 層 609 までの距離を基にしてエッチング条件を決定した。その後 SiO₂ 膜をマスクに用いた反応性イオンエッチングによってウエーハの一部を珪素添加の p 型 GaN 層 609 まで削った（図 1）。

【0146】続いて、再度成長容器 301 の中にこのウエーハを入れ、アンモニアガスを流しながら温度を 1200 °C まで上げた。1200 °C に達したところで TMG と C_pz Mg の供給を開始し、p-GaN 層 611 を 1 μm 成長させた（図 18）。その後、TMG とシランガスの供給を停止し、高周波加熱装置 305 への通電を停止した。温度が 850 °C まで下がったところでアンモニアの供給を停止した。

【0147】次に、SiO₂ 層 612 をマスクに用いた反応性イオンエッチングによってウエーハの一部を珪素添加の n 型 GaN 層 603 まで削った（図 19）。

【0148】この状態で n 型の T1 と A1 の合金の電極を形成し、SiO₂ 層 612 を取り除いてから p 型の N1 と Au の合金の電極を形成した。特に熱処理を行なうことを確認した。

【0149】以上のようにして作成したレーザーダイオードは、下地の GaN 層 603 は 1 μm の厚みがあり、Ga_{1-x}Al_xN 層 608 はマグネシウム添加で、x 値は 0.15、膜厚は 0.3 μm である。ここで、下地の GaN 層 603 と Ga_{1-x}Al_xN 層 608 との関係で（4）式が適用される。2 次イオン質量分析によるマグネシウム濃度の測定結果から、（4）式の N_{sub} は $1.2 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$ であり、 N_{heat} はバッケングラウンドレベル ($1.0 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$) であった。

【0150】したがって、走査型電子顕微鏡で見られる（4）式の穴の発生条件は、 $4 / (1600 \times 0.1) = 0.0167$ となり、 d_x の値 0.3 を下回っている。また、 $N_{\text{sub}} > N_{\text{heat}}$ であるので、 N は $1.2 \times 10^{-1} - 1.0 \times 10^{-1} = 1.0 \times 10^{-1}$ であり、（4）式のクラックの発生条件は $3.6 \times 10^{-3} \times [\log (1.2 \times 10^{-1})] / (0.15 + 0.02) + 0.02 = 0.42$ となり、 d_x の値 0.3 はこれより低いことが確認できた。

【0151】また、下地の GaN 層 603 は 4 μm の厚みがあり、Ga_{1-x}Al_xN 層 604 は珪素添加で、x 値は 0.15、膜厚は 0.3 μm である。ここで、下地の GaN 層 603 と Ga_{1-x}Al_xN 層 604 の関係

で(5)式が適用される。2次イオン質量分析による珪素濃度の測定結果から、(5)式の N_{Si} は $3.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であり、 N_{Si} はバックグラウンドレベル($3.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)であった。

【0152】したがって、正立型電子顕微鏡で見られる(5)式の穴の発生条件は、 $4 / (1600 \times 0.15) = 0.167$ となり、 d_x の値を0.3下回っている。また、 $N_{\text{Si}} > N_{\text{back}}$ であるので、 $N_{\text{Si}} = 3.6 \times 10^{17} - 3.0 \times 10^{17}$ であり、(5)式のクラックの発生条件は $3.2 \times 10^{-3} / [\log (3.3 \times 10^{17})] / (0.15 + 0.02) + 0.02 = \text{約} 0.37$ となり、 d_x の値0.3はこれより低いことが確認できた。

【0153】このようにして作製した青色レーザダイオードについて、第2の実施の形態の場合と同様にして特性測定と寿命測定を行った。動作電圧は5.0Vという値であり、ほとんど第2の実施の形態のレーザ素子と遜色の無い結果が得られた。

【0154】このように本発明の実施の形態に係る半導体素子によれば、(4)式及び(5)式の条件が成立するように各層における添加物種類、濃度及び層厚を調整したので、第2の実施の形態の場合と同様な効果を発することができる。

【0155】(第4の実施の形態)上記第1から第3の実施の形態のそれぞれ図9、図12及び図16で示した構造の内、バッファー層402/502/602とn型GaN層403/503/603との間に無添加GaNを挿入した構造を作成した。この各半導体素子について上記したように特性調査を行った。

【0156】その結果、大まかな特性にはほとんど影響が見られなかったが、成長終了した稜層構造の最表面の面状態は、当該無添加GaN層を挿入しなかった場合に比べて有意に鏡面の度合いが良く、平坦性が高まっていた。

【0157】このように本発明の実施の形態に係る半導体素子によれば、上記第1から第3の実施の形態と同様な構成に無添加GaNを挿入するにしたので、上記第1から第3の実施の形態と同様な効果を有する他、各素子の鏡面の度合いを良くし、平坦性を高めることができた。

【0158】従って、無添加GaN層を挿入することは半導体素子の特性をより高める上で望ましい。

【0159】これまで述べてきた第1から第3の各実施の形態では、p型p-オーム性電極材料としていくつか例を挙げた。しかし、本発明に用いる電極構成はこれらに限られるものではなく、上記場合と同等以上のオーム性を示す電極材料及び熱処理方法であれば良く、種々変形して実施することができる。

【0160】また、第1から第3の各実施の形態においては、(4)式及び(5)式の条件を発光素子に適

用する場合を説明した。しかし、この条件は、クラック及び穴の発生防止が望される窒化ガリウム系の半導体素子すべてに適用できるものである。したがって、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で種々の素子に応用できる。たとえば、広いバンドギャップを利用した1GHz以上の高周波電界効果素子や、2次元量子ガスを用いる超高速電子移動度トランジスタ等の作成にも最適である。

【0161】(第5の実施の形態)本実施の形態は、サファイアなどの基板上に構成されたナイトライド系半導体素子において、SiドープAlGaNクラッド層及びMgドープAlGaNクラッド層の厚さを調整する。これにより、レーザの光閉じ込め効果に問題を生じることなく、Mgドープの場合にクラックが抑制される効果を利用するものである。

【0162】具体的には、Mgドープ層AlGaN層の層厚をn型あるいはアンドープ型のAlGaN層の層厚よりも厚くする。その際、活性層と遮断層との間に設けた光ガイド層の厚さ、銀成膜クラッド層における光学的対称性を補正するように調整するなどの工夫をするものである。

【0163】図20は本発明の第5の実施の形態に係る青色半導体レーザ装置の概略構成を説明する図である。

【0164】各活性層層はすべてMOCVD(有機金属気相成長法)により成長を行った。

【0165】この青色半導体レーザ装置においては、サファイア基板101上に、低温成長(550°C)のGaNバッファー層102(層厚0.03μm)が設けられ、その上にさらに、高温(1100°C)で成長したn-GaNコントラクト層103(Siドープ、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、3μm)、Ni/Auからなるn側電極104、n-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層105(Siドープ、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、0.25μm)、多重量子井戸構造(MQW)及び光ガイド層を含む活性層部106が設けられている。

【0166】この活性層部106は、図21に詳しく述べるように、厚さ0.1μmのGaNからなる光ガイド層106a、106bを有する。また、その井戸層は3nm厚のIn_{0.04}Ga_{0.96}N3層からなり、パリヤ層は厚さ5nmのIn_{0.04}Ga_{0.96}Nから構成される。

【0167】青色半導体レーザ装置においては、活性層部106上にp-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層107(Mgドープ、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、0.35μm)が設けられ、さらにp'-GaN層成長用キャップ層108(Mgドープ、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、0.3μm)、p'-GaNコントラクト層109(Mgドープ、 $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、0.8μm)、p'-GaN高速度コントラクト層110(Mgドープ、 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、0.1μm)、n-In_{0.2}Ga_{0.8}Nからなる電流挿入層111(Siドープ、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、0.25μm)、p側電極112が設けられている。

【0168】なおサファイア基板は(0001)c面を用いており、レーザミラーはへき開により形成されている。

【0169】従来技術で述べるように、高Al組成のAlGaN層には六角形状のクラックが極めて生じやすい。このようなクラックに対する対策を講じないレーザ構造では発振には至らない。また、例えわずかな歩留りで発振に至っても過電圧に残留状態が原因と考えられる著しい劣化を示した。クラックを抑制するために単純にAlGaN層クラッド層の厚さを薄くすれば導波モードの不安定性などが顕著化し、またクラッドから外にしみだした導波モード光がAlGaN層コンタクト層などで損失を受けることとなり、低きい値のレーザは実現できない。

【0170】一方、上記したように、発振者等はMgをドープしたAlGaN層がアンドープあるいはSiドープのn型AlGaNよりも厚くクラックを発生することなく成長できることを見い出した。このようにAlGaN層を20%から50%肩厚を厚くすることができる理由は先に推測し、また、各肩厚、添加濃度をバラメータとしたクラックや穴の発生しない条件は上記(1)～(5)式に示した通りである。

【0171】図20に示すレーザ装置は、このMgによるクラック防止効果を積極的に取り入れた構造とし、

(4)式及び(5)式の条件を満たすものである。

【0172】図21は、本実施の形態のレーザのn-AlGaNクラッド層、活性層部及びp-AlGaNクラッド層の部分の伝導帯側のバンドダイヤグラムを示す図である。

【0173】クラックの発生しやすいSi-AlGaN肩105は0.25μmと薄くし、p側のクラッド層であるMg-AlGaN肩107は0.35μmと厚くしている。この組み合わせでトータルでAlを含む肩はクラックの臨界膜厚以下に設定できる。また光の導波モードに対して非対称となるが大きなきい値の増加は発生しない。逆にMg-AlGaN肩107も0.25μmと薄くするときい値は50%増大した。

【0174】本実施の形態において作製されたレーザは、きい値8.5mVで電圧連続発振した。発振波長は415nm、動作電圧は6Vであった。図20において電流狭窄層111はn型のInGaNを用いており、発光波長に対して損失を持つような構成に設定している。すなわちこの構造は損失ガイド型の横モード制御レーザであり、ストライプ幅は4μmに設定している。InGaN層は低圧700～900Vの範囲で成長させ、p-GaN層成長用キャップ層108の上にSiO₂などのマスクを残し、電流狭窄層111を成長する時に選択成長することで窓を開けている。p-AlGaNコンタクト層109もSiO₂マスクを取り除いた後、円成長で成長しており、コンタクト用にp'-AlGaN高濃度コンタクト層110はMgの濃度を特に高くした。

【0175】このように本発明の実施の形態に係る半導体レーザ装置によれば、各層におけるマグネシウムMg等の添加量及び各層の厚さを所定条件内となるように調整したので、クラックを発生させること無く、高Al組成のAlGaN層をクラッド層としてナイトライド系半導体素子に用いることができ、素子抵抗は1分に低くなり、特に半導体レーザにおいては、低きい値のみならず、信頼性も大幅に向上した。また、製造方法も簡単であり、その有用性は絶大である。

【0176】(第6の実施の形態) 本実施の形態は、サファイアなどの基板上に構成されたナイトライド系半導体素子において、SiドープAlGaNクラッド層及びMgドープAlGaNクラッド層の組成を調整する。これにより、レーザの光閉じ込め効果に問題を与えることなく、Mgドープの場合にクラックが抑制される効果を利用するものである。

【0177】すなわち、Mgドープ層AlGaN層のAl組成をn型あるいはアンドープ層のAlGaN層のAl組成よりも高くする。その際、活性層と該クラッド層との間に設けた光ガイド層の厚さ、組成をクラッド層における光学的非対称性を補止するように調整するなどの工夫をするものである。

【0178】図22は本発明の第6の実施の形態に係る部分の伝導帯側のバンドダイヤグラムを説明する図である。

【0179】レーザ構造としては図20に示す構造を用いている。本実施の形態ではクラックの発生しやすいSi-AlGaNのAl組成を10%に低くしている。n側のクラッド層であるSi-AlGaN肩105の厚さは、p側のMg-AlGaN肩107の厚さと同じ0.35μmとした。なお、(4)式及び(5)式の条件は満たされている。

【0180】この組み合わせでクラックは発生していない。またこの場合も光の導波モードに対して非対称となるが大きなきい値の増加は発生しない。本実施の形態において作製されたレーザは、きい値7.5mVで電圧連続発振した。発振波長は415nm、動作電圧は5.5Vであった。

【0181】このように本発明の実施の形態に係る半導体レーザ装置によれば、各層におけるマグネシウムMg等の添加量及び各層の厚さを所定条件内となるように調整したので、第5の実施の形態と同様な効果を奏することができる。

【0182】(第7の実施の形態) 本実施の形態は、サファイアなどの基板上に構成されたナイトライド系半導体素子において、SiドープAlGaNクラッド層及びMgドープAlGaNクラッド層の厚さを調整する。これにより、レーザの光閉じ込め効果に問題を与えることなく、Mgドープの場合にクラックが抑制される効果を利用するものである。

50 利用するものである。

【0183】すなわち、Mgドープ層AIGaN層の層厚をn型あるいはアンドープ型のAIGaN層の層厚よりも厚くする。その際、活性層と該クラッド層との間に設けた光ガイド層の厚さ、組成をクラッド層における光学的非対称性を補正するように調整するなどの工夫をするものである。

【0184】図23は本発明の第7の実施の形態に係わる部分の伝導帯側のバンドダイヤグラムを説明する図である。

【0185】クラックの発生しやすいSi-AlGaN層105は0.25μmと薄くし、p側のクラッド層であるMg-AlGaN層107は0.35μmと厚くしているのは第5の実施の形態と同じである。

【0186】光の導波モードに対して非対称となる影響は光ガイド層を工夫することで低減されている。すなわち図23に示すように、活性層部106のn側には0.1μmの光ガイド層106aを設けているが、p側は直接Mg-AlGaNがMQWに接している。n側クラッド層105を薄くしたためにn-GaN層107での光の導波モード指摘が発生してモードがp側に押やられるのをn側ガイド層106aにより引き戻す設計となっている。

【0187】本実施の形態において作製されたレーザーは、しきい値6.5mAで発振を実現した。発振波長は4.15nm、動作電圧は5Vであった。

【0188】このように本発明の実施の形態に係る半導体レーザ装置によれば、各層におけるマグネシウムMg等の添加量及び各層の厚さを所定条件内となるように調整したので、第5の実施の形態と同様な効果を発する。光ガイド層の厚さを調整することで、光学的非対称性を確実に解消することができる。

【0189】また、本実施の形態では、MQWをMg-AlGaN層107と直接接する構成としたが、この間にも光ガイド層を設け、MQW両側の各光ガイド層の厚さを調整することで非対称性補正をしてもよい。さらに、光ガイド層の組成を調整して非対称性を補正してもよい。

【0190】(第8の実施の形態) 本実施の形態は、サファイアなどの基板上に構成されたナイトライド系半導体系において、SiドープAIGaNクラッド層及びMgドープAIGaNクラッド層の組成を調整する。これにより、レーザの光閉じ込め効果に問題を生えることなく、Mgドープの場合にクラックが抑制される効果を利用するものである。

【0191】すなわち、クラックのしやすい導電型であるn型のAIGaNに対し、n型不純物以外に $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上の不純物濃度のMgを同時にドープすることでクラックを防止するものである。その際、クラッド層において光学的非対称性が生じる場合には、活性層と該クラッド層との間に設けた光ガイド層の厚さ、組成を

調整するなどの工夫して非対称性を補正するものである。

【0192】図24は本発明の第8の実施の形態に係わる青色半導体レーザ装置の概略構成を説明する図である。

【0193】各空化物層はすべてMOCVD(有機金属気相成長法)により成長を行った。

【0194】この青色半導体レーザ装置においては、サファイア基板203上に、低抵抗(5~10°C)のGaNバッファーレーザ層204(0.03μm)が設けられ、その上にさらに、高抵抗(1100°C)で成長したn-GaNコンタクト層205(Siドープ、 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、3μm)、T1/Aはからなるn側電極層206、n-Al_{0.15}GaN層207(Al_{0.15}GaN:5×10¹⁹cm⁻³、Si:5×10¹⁸cm⁻³同時ドープ0.35μm)、多重量子井戸構造(MQW)及び光ガイド層を含む活性層部208が設けられている。

【0195】活性層部208は、図25に詳しく述べよう。厚さ0.1μmのGaNからなる光ガイド層208a、208bを有している。また、その井戸層は3nm厚のIn_{0.15}GaN_{0.85}層209からなり、バリヤ層は厚さ5nmのIn_{0.15}GaN_{0.85}層から構成される。

【0196】青色半導体レーザ装置は、さらに、p-Al_{0.15}GaN_{0.85}クラッド層209(Mgドープ、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、0.35μm)、p-GaN層成長用キャップ層210(Mgドープ、 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 、0.3μm)、p-GaNコンタクト層(Mgドープ、 $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、0.8μm)211、p'-GaN高抵抗コンタクト層212(Mgドープ、 $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 、0.1μm)、p側電極213、高抵抗Al_{0.15}GaN_{0.85}層からなる埋め込み層214(アンドープ、2.25μm)を備えている。

【0197】なお、サファイア基板は(0001)c面を用いており、レーザミラーはへき面により形成されている。

【0198】図24において、埋め込み層214には高抵抗AlGaNを用いており、活性層までエッチングで掘込んだ後、選択成長で形成した。すなわちこの構造は埋め込み型、いわゆるBII構造であり、ストライプ幅は4.0μmに設定している。アンドープでもAlGaNはAl組成が高い場合には高抵抗化するが、Znなどをドープしても良い。またZnドープGaNでも良い。

【0199】図25は本実施の形態に係わる部分の伝導帯側のバンドダイヤグラムを説明する図である。

【0200】本実施の形態ではクラックの発生しやすいSi-AlGaN層207にMgを同時ドープしている。厚さはp側のクラッド層であるMg-AlGaN層209と同じく0.35μmとした。この組み合わせでクラックは発生していない。この構造でMgはクラック抑制不純物として機能している。上記したようにSi-Al

AlGaN層207には、Mgが $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、Siが $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ドープされている。Mgの不純物レベルは 1.5 meV 程度と深いため室温で活化性化し、p型、n型と補償した結果として本層207はn型となる。Mgを同時にドープすることによる光損失、nキャリヤ濃度に与える影響は小さい。

【0201】本実施の形態において作製されたレーザは、しきい値 7 mA で室温運続発振した。発光波長は 4.15 nm 、動作電圧は 5 V であった。

【0202】このように本発明の実施の形態に係る半導体レーザ装置によれば、各層におけるマグネシウムMg等の添加量及び各層の厚さを所定条件内となるように調整したので、第5の実施の形態と同様な効果を奏すことができる。

【0203】(第9の実施の形態) 1:記第1~第8の各実施の形態では、(4)式及び又は(5)式により得られる条件に適合させることでAlGaN層のクラック発生を防止するようにしていた。これに対し、本実施の形態は、AlGaN層の肩層の純度を全エピタキシャル肩層の半分以上にして、肩構造の支配的な格子定数がAlGaN層のものになるようにすることで、Al導入に伴う格子不整によりAlGaN層にクラック等が発生するのを防止する。つまり、左たる肩をAlGaN層にしようという考え方である。

【0204】図26は本発明の第9の実施の形態に係る空素を含む化合物半導体素子を適用した青色半導体レーザ装置の概略構成を示す断面図である。

【0205】この青色半導体レーザ装置における各空化物層は、すべてMOCVD(有機金属気相成長法)により成長させたものである。

【0206】まず、図26に示すサファイヤ基板11上に、低温(550°C)でGaNバッファー層12(0.03 μm)を成長させ、続いて高温(1100°C)にてGaN単結晶バッファー層13(0.3 μm)を成長させる。

【0207】さらに、その上に十分に厚いn-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nコンタクト層14(Siドープ、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、1.5 μm)と、n-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層15(Siドープ、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、0.2 μm)と、活性層16と、p-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層17(Mgドープ、 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、0.2 μm)と、GaNコンタクト層18(Mgドープ、 $1 \times 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、0.1 μm)とを順次成長させる。

【0208】そして、GaNコンタクト層18上にp側電極20、n-AlGaNコンタクト層14上にn側電極19が設けられて、青色半導体レーザ装置として構成されることになる。なお、活性層16は、100オングストロームのIn_{0.01}Ga_{0.99}Nが両側Al_{0.15}Ga_{0.85}Nで挟まれた構造となっている(アンドープ)

図26に示す青色半導体レーザ装置の半導体素子部分

は、主にGaNからなる肩としては低温成長GaNバッファー層12と、高温GaN単結晶バッファー層13と、GaNコンタクト層18とがあり、その合計肩層は、約0.43 μm である。一方、主にAlGaNからなる肩としてはn-AlGaNコンタクト層14と、n-AlGaNクラッド層15と、活性層16と、p-AlGaNクラッド層17とがあり、その合計肩層は、約1.9 μm である。

【0209】このように本実施形態の構造では、GaN層に対して、AlGaN層が厚く、肩構造を構成する支配的な格子定数はAlGaN層のものとなる。

【0210】この様子を図27の概念図に示す。この場合、各GaN層はクラック等を生じない臨界膜厚以下となっており、上締りが導入された状態となっているものの、転位など新たに発生することなく、肩構造を形成・維持することができる。

【0211】なお、このような本実施の形態に示すようにAlGaN層が肩構造の支配的な肩となる構成とせず、かつ:記(4)式又は(5)式の条件も満たさない場合に、図28の概念図に示すようにAlGaN層に引っ張り歪みが生じることになり、クラックが発生する。

【0212】ところで、サファイヤ基板を用いてAlGaN層を形成する場合、本実施の形態でも実施したように、基板と直接もしくは基板付近にGaNの単結晶層を挿入することが必要である。これは、Alを含むナイトライド結晶に比べGaN結晶が結晶性質を有していないので、サファイヤ基板、あるいは下記で述べる低温成長肩との組み合いでこのGaN層の存在によって、それ以降の結晶成長を維持することが可能となるからである。したがって、サファイヤ基板からGaN層を全く介すことなく貴重なAlGaN層を成長させ続ける構造とすることは、一般に困難とされている。

【0213】このように高温GaN単結晶バッファー層13は、サファイヤ基板11もしくはアモルフォス層である低温成長GaNバッファー層12との格子不正を緩和するために導入され、かかる目的を達成するために臨界膜厚以下の単結晶層となっている。

【0214】このように高温GaN単結晶バッファー層13は、n-AlGaNコンタクト層14以降の層に対する結晶成長時の転位伝搬を防止すると共に、半導体素子形成後の上記上締り歪みによる転位発生を抑える働きをしている。つまり、この高温GaN単結晶バッファー層13がないと、半導体素子形成後のAlGaN層に起因して発生する上締り歪みにより、アモルフォス層である低温成長GaNバッファー層12に転位等が入ることになる。この転位はl:方向に伝搬し、結晶発光素子部を含むAlGaN層にも転位等を生じるが、本実施形態では、高温GaN単結晶バッファー層13により転位発生・伝搬が防止されている。

【0215】なお、高温GaN単結晶バッファー層13自体は、上記したように臨界膜厚以下であるのでここから転位・クラック等を新たに生じることはない。

【0216】また、サファイア基板11との界面には、上記したように低温成長したアモルフォス状のGaNバッファー層12が設けられている。なお、このバッファー層12は低温成長したAlNバッファー層等のアモルフォス層でもよい。このようなバッファー層12が設けられる理由は、低温成長バッファー層がアモルフォス状であれば、成長層の核化形成には支配的な晶核剝離を果たすが、格子不整に関しては存在する転位等によって緩和する方向に働くからである。したがって、このような低温バッファー層の存在によってサファイア基板との格子不整が大幅に緩和され、以降の結晶成長が良好に統けられることになる。

【0217】したがって、この低温成長バッファー層の存在により単結晶性の良いAlGaN層の成長が可能となり、これにより、AlGaN層からなる発光素子部をも形成可能となる。

【0218】AlGaN層の総和が全エピタキシャル層厚の半分以上である場合、層構造を構成する支配的な格子不整は厚い側のAlGaN層のものとなり、良好な結晶状態が維持される。なお、AlGaN層は光閉じ込めのためにある程度厚膜が必要であるが、GaN層はコンタクト層などキャリヤ濃度などを適正化すれば総層厚を薄くできるので、上記構造を実現することが可能である。

【0219】また、コンタクト層としての測定評価をしたところGaNの屈折率が原因と考えられる。コンタクト抵抗の低減効果が見られた。GaNの屈折率としてAlGaN層のAl組成が10%を超える段から以上のような改善につながる効果が得られ始めた。また基板としてはサファイアなどの酸化物系基板の場合がこのようない、AlGaN層による格子定数差が適している。

【0220】以上のように構成された青色半導体レーザ装置は、しきい値1.05mWで蓄積パルスを発振した。発振波長は415nm。動作電圧は1.0Vであった。

【0221】このように本発明の第9の実施の形態に係る窒素を含む化合物半導体素子においては、エピタキシャル層におけるAlGaN層の厚さを半分以上とし、層構造を構成する支配的な格子不整をAlGaN層のものとするようにしたので、クラックを発生させることのない良好なAlGaN層を得ることができ、Al組成のAlGaN層をクラック層としてナイトライド系半導体素子に用いることができる。その有用性は絶大である。

【0222】したがって、素子抵抗を十分に低くすることができ、特に半導体レーザにおいては、低しきい値を実現できるのみならず、信頼性も大幅に向かせることができる。これにより、活性層への光閉じ込め、キャリヤ閉じ込め等を十分行うことができる優れた特徴の窒素

を含む化合物半導体素子を提供することができる。

【0223】また、本実施の形態の窒素を含む化合物半導体素子においては、サファイア基板11とn-AlGaNコンタクト層14との間に、低温成長GaN単結晶バッファー層13を設け、基板11とナイトライド系半導体成長層との組成的な格子不整合を解消し、さらに、支配的な格子定数がAlGaN層のものであることによる格子不整を吸収するようにしたので、新たな転位・クラック等の発生を防止することができ、転位・クラックの少ない化合物半導体素子を得ることができる。したがって、素子抵抗を十分に低くすることができる。この単結晶GaNバッファー層13が設けられることで、結晶表面の平坦性も改善され、良好なAlGaN層の成長を可能ならしめている。

【0224】なお、AlGaN層の厚さ条件を本実施の形態の場合と同様にし、かつ(4)式及び(5)式の条件に適合させた半導体発光素子を製造してもよい。このようにすれば、より一層確実にAlGaN層のクラック発生を防止し、信頼性の高い窒化ガリウム系半導体素子を得ることができる。

【0225】(第10の実施の形態) I:記第1~第8の各実施の形態では、(4)式及び(5)式により得られる条件に適合させることでAlGaN層のクラック発生を防止するようになっていた。これに対し、本実施の形態は、第9の実施の形態と同様、AlGaN層の層厚の範囲を全エピタキシャル層厚の半分以上にして、層構造の支配的な格子定数がAlGaN層のものになるようにして、Al導入に伴う格子不整によりAlGaN層にクラック等が発生するのを防止する。つまり、主たる層をAlGaN層にしようという考え方である。

【0226】図29は本発明の第10の実施の形態に係る窒素を含む化合物半導体素子を適用した青色半導体レーザ装置の概略構成を示す断面図である。

【0227】この青色半導体レーザ装置における各窒化物層は、すべてMOCVD(有機金属気相成長法)により成長させたものである。

【0228】まず、図29に示すサファイア基板21上に、まず、低温(550°C)でAlGaNバッファー層22(0.3μm)を成長させ、続いて高温(1100°C)にてGaN単結晶バッファー層40(0.3μm)を成長させる。

【0229】さらに、その上に十分に厚いn-Al_{0.1}G_{0.9}N層23(S1ドープ、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、1.5μm)と、AlGaN層23中に形成された50オングストローム厚のn-GaN(S1ドープ、 $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)及び50オングストローム厚のn-Al_{0.1}G_{0.9}N層(S1ドープ、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)50μmからなる超格子コンタクト層24と、n-Al_{0.1}G_{0.9}Nクラッド層25(S1ドープ、 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)を成長させる。

m^{-1} 0.2 μm) と、100オングストロームの $1 n$ n 、 $Ga_{1-x}Al_xN$ が両側 $Al_{1-x}Ga_xN$ で挟まれた構造となったアンドープの活性層 2 6 と、 $p-Al_{1-x}Ga_xN$ ネクリップ層 2 7 (Mg ドープ、 $5 \times 10^{17} cm^{-2}$ 0.2 μm) と、 GaN コンタクト層 2 8 (Mg ドープ、 $1 \sim 3 \times 10^{18} cm^{-2}$ 0.1 μm) を順次成長させる。そして、 p 側電極 3 0 と n 側電極 2 9 とが設けられて、青色半導体レーザ装置として構成される。

【0230】なお、 GaN 単結晶バッファー層 4 0 は、第9の実施の形態の GaN 単結晶バッファー層 1 3 の場合と同様の目的のために設けられている。また、ここでは特に細述しないが、低温成長させた $AlGaN$ バッファー層 2 2 は、第9の実施の形態で説明した低温成長 GaN バッファー層 1 2 と同様な働きをしている。

【0231】以上のように構成された青色半導体レーザ装置は、しきい値 5.5 nm で室温連続発振した。発振波長は 4.15 nm 、動作電圧は 5 V であった。

【0232】このように、本発明の第10の実施の形態に係る窒素を含む化合物半導体粒子においては、第9の実施の形態と同様な構成の他、 $n-AlGaN$ と GaN とを含む超格子構造のコンタクト層を設けたので、第9の実施の形態と同様な効果が得られる他、コンタクト抵抗上昇を抑えることができ、より一層の低抵抗化を図ることができる。

【0233】すなわち、電極 2 9 形成後のアロイ化によってバリヤの高さが低くなり、また、注入された電流を超格子中の擬似 2 次元電子ガスによって低抵抗に活性層化まで輸送することができる。

【0234】また、 $AlGaN$ 層の厚さ条件を本実施の形態の場合と同様に、かつ(4)式及び(5)式の条件に適合させた半導体発光素子を製造してもよい。このようにすれば、より一層確実に $AlGaN$ 層のクラック発生を防止し、信頼性の高い窒化ガリウム系半導体素子を得ることができる。

【0235】なお、上記第1～第10の実施の形態においては、基板としてツファイヤを用いた場合で説明したが、本発明に適用できる基板はこれに限定されるものではなく、例えばシリコンオキサイド SiO_2 、ジンクオキサイド ZnO 、炭化ケイ素 SiC 、スピニル基等種々の基板を使用することが可能である。

【0236】また、上記第1～第10の実施の形態においては、使用する半導体層として GaN 単結晶バッファー層の代わりに SiC なども適用可能で、II-VI族化合物半導体、 Si 、 Ge などを用いても良い。さらに、ここで半導体粒子としての機能を発揮する対象層を $AlGaN$ の場合で説明したが、これに In 、 Ti 、 Si 、 C 、 N 、などの元素を混入にならない不純物濃度の量、含んでいても良い。本発明で得られる半導体粒子はレーザの他、構造的にほとんど同じ発光ダイオードに適用可能であることは勿論、化合物半導体を用いた受光素子

子、或いはヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT)、高移動度トランジスタ (HEMT) 等のトランジスターなどの種々の電子デバイス分野へも適用が可能である。

【0237】なお、本発明は、上記各実施の形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で種々に変形することが可能である。

【0238】

【発明の効果】以上詳記したように本発明によれば、 Al 密入に伴う格子不整界面を回避し、 $Ga_{1-x}Al_xN$ の原形を薄することなくクラックの発生を防止し、かつ、 $AlGaN$ 層の Al 組成を高くし、例えば活性層への光閉じ込めやキャリア閉じ込めが十分なされ得る窒化ガリウム系半導体粒子及び窒化ガリウム系半導体発光装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の形態の結晶成長に用いる有機金属気相成長装置の概略構成図。

【図2】マグネシウムを添加した場合における、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 層の組成及び膜厚と、クラック発生との関係を示す図。

【図3】珪素を添加した場合における、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 層の組成及び膜厚と、クラック発生との関係を示す図。

【図4】 $GaAlN$ 層の厚さ及び Al 組成と GaN 層の厚さと関係を示す図。

【図5】 $GaAlN$ 層の厚さ及び Al 組成と GaN 層の厚さと関係を示す図。

【図6】 $GaAlN$ 層の厚さ及び Al 組成と GaN 層の厚さと関係を示す図。

【図7】マグネシウムを添加して作成した試料における、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 層の組成及び膜厚と、クラック発生との関係を示す図。

【図8】珪素を添加して作成した試料における、 $Ga_{1-x}Al_xN$ 層の組成及び膜厚と、クラック発生との関係を示す図。

【図9】本発明の第1の実施の形態の発光ダイオードのI-V特性面図。

【図10】同実施の形態の発光ダイオードのI-V特性面図。

【図11】同実施の形態の発光ダイオードのI-V特性面図。

【図12】本発明の第2の実施の形態のレーザダイオードのI-V特性面図。

【図13】同実施の形態のレーザダイオードのI-V特性面図。

【図14】同実施の形態のレーザダイオードのI-V特性面図。

【図15】同実施の形態のレーザダイオードのI-V特性面図。

【図16】本発明の第3の実施の形態のレーザダイオードの構成面図。

【図17】同実施の形態のレーザダイオードの構成面図。

【図18】同実施の形態のレーザダイオードの構成面図。

【図19】同実施の形態のレーザダイオードの構成面図。

【図20】本発明の第5の実施の形態に係る青色半導体レーザ装置の概略構成を説明する図。

【図21】同実施の形態のレーザのn- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層、活性層及びp- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層の部分の伝導帯側のパンドダイヤグラムを示す図。

【図22】本発明の第6の実施の形態に係る部分の伝導帯側のパンドダイヤグラムを説明する図。

【図23】本発明の第7の実施の形態に係る部分の伝導帯側のパンドダイヤグラムを説明する図。

【図24】本発明の第8の実施の形態に係る青色半導体レーザ装置の概略構成を説明する図。

【図25】同実施の形態に係る部分の伝導帯側のパンドダイヤグラムを説明する図。

【図26】本発明の第9の実施の形態に係る青色半導体レーザ装置の概略構成を示す断面図。

【図27】同実施の形態の化合物半導体素子においてクラック発生が防止される様子を示す図。

【図28】引っ張り込みによりp- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 間にクラック発生する様子を示した図。

【図29】本発明の第10の実施の形態に係る青色半導体レーザ装置の概略構成を示す断面図。

【符号の説明】

1 1…サファイヤ基板

1 2… GaN バッファー層

1 3… GaN 単結晶バッファー層

1 4…n- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ コンタクト層

1 5…n- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層

1 6…活性層

1 7…p- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層

1 8… GaN コンタクト層

1 9…n側電極

2 0…p側電極

2 1…サファイヤ基板

2 2…p- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ バッファー層

2 3…n- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 層

2 4…超格子コンタクト層

2 5…n- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層

2 6…アンドープの活性層

2 7…p- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層

2 8… GaN コンタクト層

2 9…n側電極
3 0…p側電極
4 0… GaN 単結晶バッファー層
1 0 1…サファイヤ基板
1 0 2… GaN バッファー層
1 0 3…n- GaN コンタクト層
1 0 4…n側電極
1 0 5…n- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層
1 0 6…活性層

10 1 0 6 a, 1 0 6 b…光ガイド層
1 0 7…p- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層
1 0 8…p- GaN 成長用キャップ層
1 0 9…p- GaN コンタクト層
1 1 0…p- GaN 高濃度コンタクト層
1 1 1…電極狭窄層

1 1 2…p側電極 1 1 2
2 0 3…サファイヤ基板
2 0 4… GaN バッファー層
2 0 5…n- GaN コンタクト層
2 0 6…n側電極

2 0 7…n- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層
2 0 8…活性層
2 0 8 a, 2 0 8 b…光ガイド層
2 0 9…p- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層
2 1 0…p- GaN 成長用キャップ層
2 1 1…p- GaN コンタクト層
2 1 2…p- GaN 高濃度コンタクト層
2 1 3…p側電極

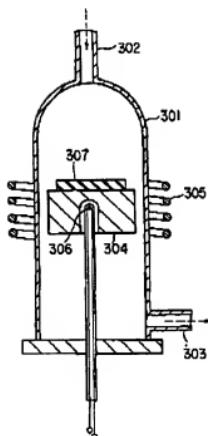
2 1 4…埋め込み層
3 0 1…石英製の成長容器

3 0 2…ガス導入口
3 0 3…ガス排出口
3 0 4…セゼタ
3 0 5…高周波加熱装置
3 0 6…W熱電対
3 0 7…基板
4 0 1…サファイヤ基板
4 0 2… GaN - $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ バッファー層
4 0 3…n型 GaN 層

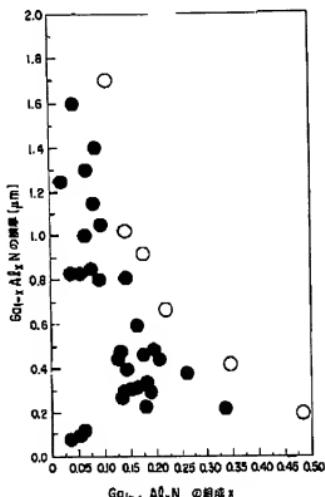
40 4 0 4…多量子井戸構造活性層
4 0 5…マグネシウム添加のp型 $\text{GaN}_{0.85}\text{Al}_{0.15}\text{N}$ 層
4 0 5
4 0 6…マグネシウム添加のp型 GaN 層
4 0 7…n型 GaN 層
4 0 8, 4 0 9…電極
5 0 1, 5 0 1…サファイヤ基板
5 0 2, 5 0 2… GaN バッファー層
5 0 3, 5 0 3…n型 GaN 層
5 0 4, 5 0 4…n型の珪素添加の $\text{GaN}_{0.85}\text{Al}_{0.15}\text{N}$

505, 605…無添加のGaN層
 506, 606…多重量子井戸構造活性層
 507, 607…p型GaN層
 508, 608…マグネシウム添加のp型GaN層
 a. 15N層
 509, 609…マグネシウム添加のp型GaN層

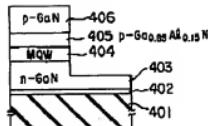
【図1】



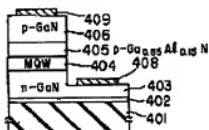
【図2】



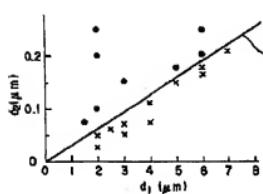
【図10】



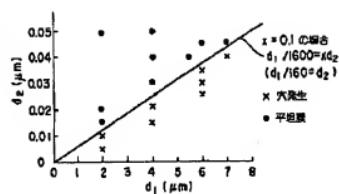
【図11】



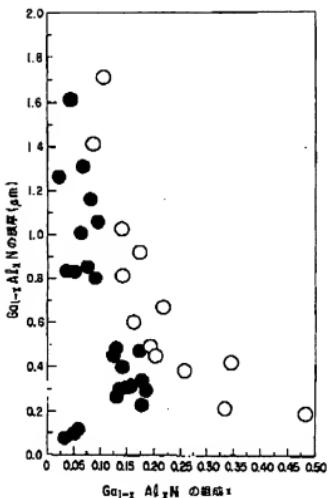
【図4】



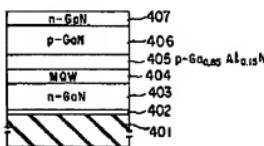
【図5】



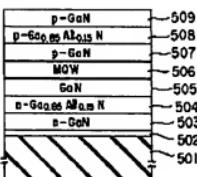
【図3】



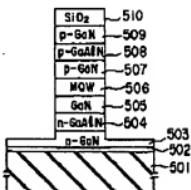
【図9】



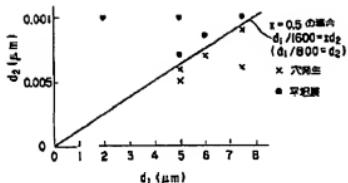
【図12】



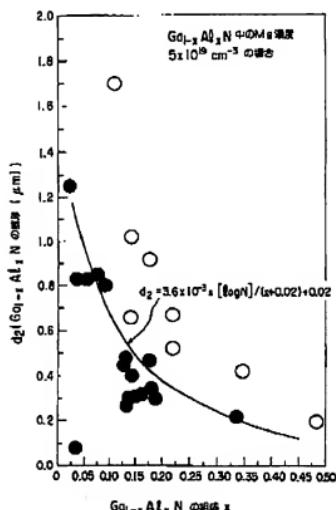
【図13】



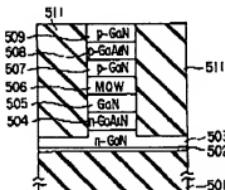
【図6】



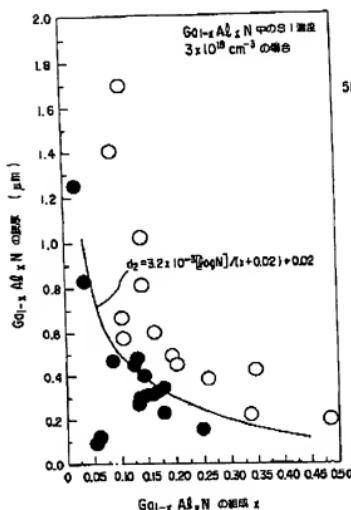
【図7】



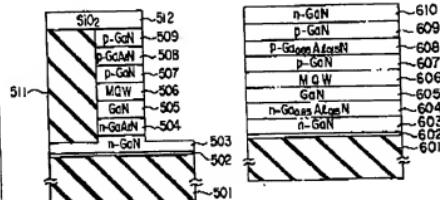
【図14】



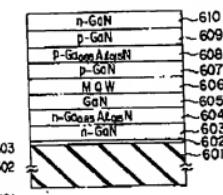
[図8]



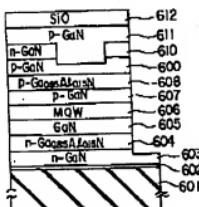
[図15]



[図16]

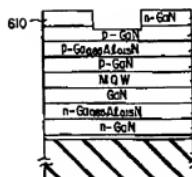


[図19]

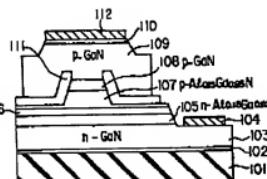
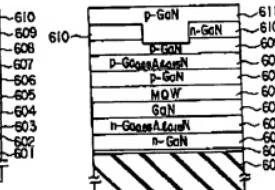


[図20]

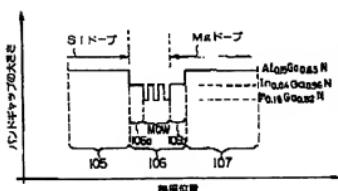
[図17]



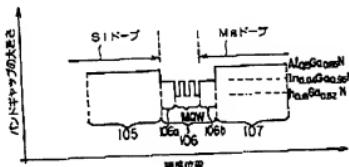
[図18]



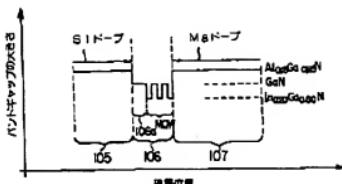
[図21]



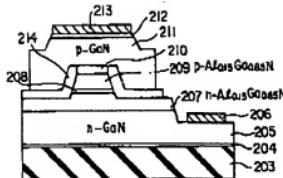
[図22]



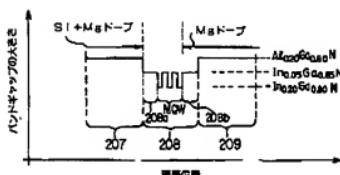
【図23】



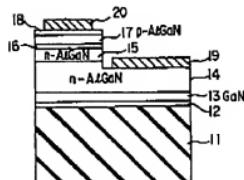
【図24】



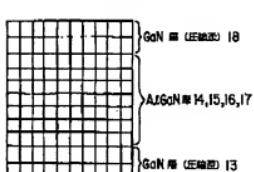
【図25】



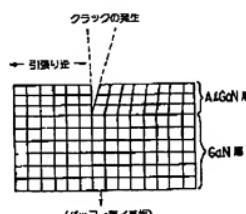
【図26】



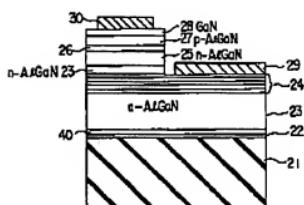
【図27】



【図28】



【図29】



フロントページの続き

(72) 発明者 鈴木 真理子
神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株
式会社東芝研究開発センター内

(72) 発明者 杉浦 理紗
神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株
式会社東芝研究開発センター内